

**IB 131-2015/024**

**Untersuchungen von Torsionsproben zur  
Kenndatenermittlung von Klebstoffen mit Hilfe  
der Finiten Elemente Methode (FEM)**

**Masterarbeit**

Johannes Wölper, Thomas Löbel



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Braunschweig**

Juni / 2015





Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtzgemeinschaft  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

**IB 131-2015/024**

**Untersuchungen von Torsionsproben zur  
Kenndatenermittlung von Klebstoffen mit Hilfe der Finiten  
Elemente Methode (FEM)**

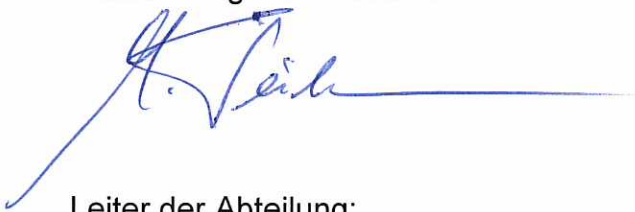
**Masterarbeit**

Braunschweig, Juni, 2015

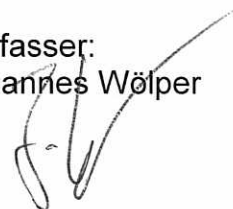
Der Bericht umfasst:

150 Seiten

Institutsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Verfasser:  
Johannes Wölper



Leiter der Abteilung:  
Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne





# Untersuchungen von Torsionsproben zur Kenndatenermittlung von Klebstoffen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM)

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science

vorgelegt von: Dipl.-Ing.(FH) Johannes Wölper

Matrikelnummer: 3024798

Erstgutachter: Prof. Michael Sinapius

© 2015



## Abstract

In dieser Arbeit wird zunächst erläutert warum kontinuumsmechanische Materialmodell eine geeignete Modellierungsmethode zur Auslegung von Klebverbindungen in der FEM darstellen. Im Anschluss werden mehrere Materialmodelle auf ihre Eignung betrachtet sowie ihr Kenndatenbedarf zusammengefasst. Die Torsionsrohrproben zeigen sich dabei geeignet um alle notwendigen Kenndaten zu ermitteln, so dass diese im folgenden näher betrachtet werden. Gegeben Versuchsdaten von Rohrproben werden hierzu näher untersucht.

Dabei steht das Messverfahren, so wie Fertigungseinflüsse, im Zentrum der Betrachtung. Bezüglich der Fertigungseinflüsse werden Wärmedehnung, Versatz der Fügekörper und Poren untersucht. Gezeigt wird ein deutlicher Verbesserungsbedarf bezüglich der Probenfertigung und Messung. Zur Verbesserung der Aussagegüte zukünftiger Versuchsergebnisse werden zudem, mittels FEM-Simulationen, Optimierungsansätze für die Probengeometrie betrachtet. Dabei zeigt sich, dass leichte Änderungen der Fügepartnergeometrie an oder im Nahbereich der Klebschicht, bereist deutliche positive Einflüsse zeigen.

-

There are different methods for modelling adhesive joints in FEM-simulation. At the beginning of this thesis it is shown why continuum mechanic material models are useful for the aim of sizing bonded structures. Following on this selection some material-models are checked on their abilities. Also their need on input data is summarized. Selecting from different test-methods, the tube-torsion-test show the ability to generate all needed input data. Subsequently available tube-tension/torsion-tests are interpreted to identify manufacturing influences and measurement inaccuracies. Resulting from this interpretation the test-procedure needs some updates to improve currently weak test-results. Furthermore, the specimen geometry is studied with FEM-simulations to find optimization approaches. This study show positive effects of small changes in adherend geometry at or close to the adhesive.



## Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig angefertigt und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift







## Masterarbeit

für

Dipl.-Ing.(FH) Johannes Wölper

Matrikelnummer.: 30 24 798

# Untersuchungen von Torsionsproben zur Kenndatenermittlung von Klebstoffen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM)

## Übersicht

Mit der Einführung einer neuen Generation an Verkehrsflugzeugen wie dem Airbus A350 und der Boeing 787 hat sich das Einsatzgebiet von Faserverbundwerkstoffen (FVW) auf die meisten Bereiche von Flugzeugstruktur ausgedehnt. Für das Fügen und Reparieren solcher Strukturen bedarf es effektiver Verbindungsverfahren.

Derzeit verwendete Auslegungskriterien und Standards bedingen das Einbringen einer Vielzahl von Bolzenelementen und lokale Materialaufdickungen in Verbindungsbereichen. Derartige Verbindungsstellen sind daher aus Gewichts- und Kostenaspekten für dünnwandige Faserverbundstrukturen nachteilig. Klebeverbindungen sind diesbezüglich konventionellen Bolzenverbindungen überlegen und bieten aufgrund einer homogenen Lasteinleitung Vorteile aus strukturmechanischer Sicht.

Um Klebeverbindungen numerisch zu untersuchen und auszulegen, werden Materialkenn-daten benötigt. Der Umfang der benötigten Kennwerte ist dabei abhängig vom verwendeten Materialmodell. Zur Bestimmung des Scherverhaltens und zur Kennwertermittlung struktureller Klebungen ist das Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf verklebter Hohlzylinder vorteilhaft, da kombinierte Belastungszustände variabel zwischen Schub- und Zug-/Druckbelastung eingestellt werden können.

## Aufgabenstellung

Bereits durchgeführte Experimente zu dieser Probengeometrie sind im Rahmen der Arbeit auszuwerten und zu interpretieren. Aus den gewonnenen Ergebnissen sind Materialdaten für ein Finite Elemente Modell abzuleiten. Das Experiment selbst soll im Folgenden mit Hilfe der FE-Methode abgebildet werden. Hierfür soll ein vorhandenes kontinuumsmechanisches Materialmodell für die Klebschicht ausgewählt und verwendet werden. Die Eignung des gewählten Modells ist durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen zu bewerten.

Darauf aufbauend ist der Einfluss der Fügespaltform (z.B. Kantenradien und Fasen) und der Einfluss beobachteter bzw. möglicher Fertigungseinflüsse (Dickenvarianz der Klebschicht,

Poren und Weitere) auf die Testergebnisse zu untersuchen und zu bewerten. Auf Grundlage dieser Bewertung sind mögliche Verbesserungsvorschläge für die Prüfkörperfertigung und Probenprüfung abzuleiten.

### **Arbeitsschritte**

Im Einzelnen sind folgende Arbeitsschritte zu leisten:

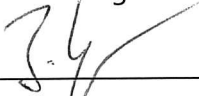
- Literaturrecherche zu Thema der Masterarbeit
- Auswertung bereits durchgeführter Experimente und Ableitung von Materialkennwerten
- Auswahl eines geeigneten Materialmodells zur Klebschichtmodellierung
- Aufbau des FE-Modells und Sensitivitätsanalyse der Klebstoffmaterialparameter
- Bewertung des gewählten Materialmodells
- Untersuchungen & Bewertung zum Einfluss der Fügespaltform
- Untersuchungen & Bewertung zum Einfluss von Fertigungseinflüssen
- Schritthaltende Dokumentation in Form einer wissenschaftlichen Ausarbeitung und Präsentation der Ergebnisse in einem Kolloquium

Die Masterarbeit wird am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, in Braunschweig durchgeführt und seitens des DLR von Herrn Dipl.-Ing. Thomas Löbel betreut.

Für Planung, Berechnung, Untersuchungen und Dokumentation können Labore, Werkzeuge, Einrichtungen, Programme und Rechenanlagen des DLR benutzt werden. Die Unterstützung durch das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik umfasst die Beratung sowie Hilfe bei der Einarbeitung in die Theorie und Praxis. Die Ergebnisse sind entsprechend dem Fortschritt der Arbeit, mindestens aber einmal wöchentlich mit dem Betreuer abzusprechen.

Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des Institutes möglich.

Hiermit bestätige ich den Empfang der Aufgabenstellung

  
\_\_\_\_\_  
Johannes Wölper

Bearbeitungszeit: 6 Monate

Ausgegeben am: 07.01.2015

Abgegeben am:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Simulationsmethoden für Klebverbindungen und deren Charakterisierungsproben</b>	<b>3</b>
2.1. Materialverhalten von Klebstoffen . . . . .	3
2.2. Bruchmechanische Ansätze . . . . .	5
2.2.1. Grundlagen der linearen Bruchmechanik . . . . .	5
2.2.2. Simulationsmethoden . . . . .	7
2.2.3. Charakterisierungsproben . . . . .	9
2.3. Kontinuumsmechanischer Ansatz . . . . .	10
2.3.1. Grundlegender Aufbau von elastisch-plastischen Materialmodellen	11
2.3.2. Charakterisierungsproben . . . . .	13
2.4. Auswahl einer Modellierungsmethode . . . . .	18
<b>3. Materialmodelle zur FEM Simulation von Klebstoffen</b>	<b>21</b>
3.1. Kontinuumsmechanische Grundlagen . . . . .	21
3.2. Materialmodell nach von Mises . . . . .	23
3.2.1. Fließbedingung . . . . .	23
3.2.2. Eingangsparameter . . . . .	23
3.3. Materialmodell nach Drucker-Prager . . . . .	24
3.3.1. Fließbedingung . . . . .	24
3.3.2. Eingangsparameter . . . . .	25

3.4.	Materialmodell nach Raghava . . . . .	26
3.4.1.	Fließbedingung . . . . .	26
3.4.2.	Eingangsparameter . . . . .	27
3.5.	Materialmodell nach Schlimmer . . . . .	27
3.5.1.	Fließbedingung . . . . .	27
3.5.2.	Eingangsparameter . . . . .	28
3.6.	Auswahl eines geeigneten Materialmodells . . . . .	28
<b>4.</b>	<b>Interpretation der Versuchsergebnisse</b>	<b>33</b>
4.1.	Beschreibung des Versuchsaufbaus . . . . .	33
4.2.	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	36
4.2.1.	Einfluss von Fertigungsabweichungen . . . . .	36
4.2.2.	Einfluss des Messverfahrens . . . . .	40
4.2.3.	Auswertung der Messdaten . . . . .	41
4.3.	Ableiten von Parametern für das gewählte Materialmodell . . . . .	45
4.4.	Zusammenfassung . . . . .	48
<b>5.</b>	<b>Aufbau und Validierung des FE-Modells</b>	<b>51</b>
5.1.	Analytische Rechnung . . . . .	51
5.1.1.	Zugbelastung . . . . .	51
5.1.2.	Torsionsbelastung . . . . .	54
5.1.3.	Bestimmung der Verschiebungsgesteuerten Lasten . . . . .	56
5.2.	Allgemeiner Modellaufbau . . . . .	59
5.2.1.	Elementierung . . . . .	59
5.2.2.	Modellgliederung . . . . .	60
5.2.3.	Materialdefinition . . . . .	60
5.2.4.	Simulationsmethode . . . . .	60
5.3.	Simulationsmodelle unterschiedlichen Idealisierungsgrades . . . . .	61
5.3.1.	Gesamtmodell . . . . .	62
5.3.2.	Ringmodell . . . . .	64
5.3.3.	Ringsegmentmodell . . . . .	65

5.4.	Sensitivitätsuntersuchung des Klebstoffmodells . . . . .	68
5.4.1.	Auswertung der Simulation . . . . .	68
5.4.2.	Einfluss des Lastfalls . . . . .	69
5.4.3.	Einfluss der Eingangsgrößen . . . . .	73
5.4.4.	Zusammenfassung . . . . .	73
<b>6.</b>	<b>Untersuchung von Fertigungseinflüssen</b>	<b>75</b>
6.1.	Eigenspannungen durch den Aushärtezyklus . . . . .	75
6.1.1.	FE-Modell . . . . .	75
6.1.2.	Ergebnisse . . . . .	78
6.1.3.	Zusammenfassung . . . . .	80
6.2.	Fügekörper Positionierung . . . . .	81
6.2.1.	FE-Modell . . . . .	81
6.2.2.	Ergebnisse . . . . .	82
6.2.3.	Zusammenfassung . . . . .	84
6.3.	Poren . . . . .	84
6.3.1.	FE-Modell . . . . .	84
6.3.2.	Ergebnisse . . . . .	85
6.3.3.	Zusammenfassung . . . . .	85
6.4.	Bewertung der Fertigungseinflüssen . . . . .	87
<b>7.</b>	<b>Parameterstudie zum Einfluss der Probengeometrie</b>	<b>89</b>
7.1.	Fasen an den Fügepartnern . . . . .	89
7.1.1.	FE-Modell . . . . .	89
7.1.2.	Ergebnisse . . . . .	90
7.1.3.	Zusammenfassung . . . . .	92
7.2.	Geometrie des Klebschichtauslaufs . . . . .	93
7.2.1.	FE-Modell . . . . .	93
7.2.2.	Ergebnisse . . . . .	93
7.2.3.	Zusammenfassung . . . . .	94

7.3. Nuten oberhalb der Fügefläche . . . . .	96
7.3.1. FE-Modell . . . . .	96
7.3.2. Ergebnisse . . . . .	97
7.3.3. Zusammenfassung . . . . .	98
7.4. Radius an Fügepartnerkanten . . . . .	99
7.4.1. FE-Modell . . . . .	99
7.4.2. Ergebnisse . . . . .	99
7.4.3. Zusammenfassung . . . . .	100
7.5. Auswertung Geometrievariation . . . . .	101
<b>8. Zusammenfassung</b>	<b>103</b>
8.1. Modellierung und Materialmodelle . . . . .	103
8.2. Prüfkörpereinfluss auf Qualität der Versuchsergebnisse . . . . .	104
8.3. Ausblick . . . . .	104
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>107</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>113</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>115</b>
<b>Appendices</b>	<b>119</b>
<b>A. Testergebnisse Rohrproben Lastkombinationen</b>	<b>121</b>
<b>B. Detail Darstellung der Gesamtmodell Vernetzung</b>	<b>125</b>
<b>C. Detail Darstellung der Ringmodell Vernetzung</b>	<b>127</b>
<b>D. Detail Darstellung der Ringsegment Vernetzung</b>	<b>129</b>
<b>E. Simulationsergebnisse zu Kombinierten Lastfällen</b>	<b>131</b>

# Abkürzungsverzeichnis

<b>CFK</b>	carbonfaserverstärkter Kunststoff.....	10
<b>CNC</b>	Computerized Numerical Control	
<b>CZM</b>	Cohesive Zone Modeling.....	7
<b>DCB</b>	Double-Cantilever Beam.....	9
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.....	1
<b>DMA</b>	dynamisch-mechanische Analyse.....	77
<b>ENF</b>	End-Notched Flexure.....	9
<b>FAA</b>	Federal Aviation Administration.....	4
<b>FEM</b>	Finite Elemente Methode.....	1
<b>LuFo</b>	Luftfahrtforschungsprogramm.....	18
<b>LZS</b>	Leichtbauzentrum Sachsen.....	33
<b>MPC</b>	Multi-Point Constraints.....	60
<b>NPL</b>	National Physical Laboratory.....	28
<b>RVE</b>	repräsentatives Volumenelement.....	4
<b>TMA</b>	thermomechanische Analyse.....	78
<b>VCCT</b>	Virtual Crack Closure Technique.....	7





# Mathematische Symbole

## *Griechische Symbole*

$\alpha^*$	Steigung der Fließortkurve
$\alpha_{Last}$	Lastverhältnis
$\delta_{init}$	CZM - Rissöffnung bei Schädigungsbeginn
$d\varepsilon$	Verzerrungssinkrement
$d\varepsilon^e$	elastischer Anteil Verzerrungssinkrement
$d\varepsilon^P$	plastischer Anteil Verzerrungssinkrement
$d\varepsilon_e$	Vergleichsdehnung
$\varepsilon_{Gesamt}$	Gesamtregressionskurve Zugversuche
$\varepsilon_{Min}$	Min. Regressionskurve Zugversuche
$\varepsilon_{Max}$	Max. Regressionskurve Zugversuche
$d\lambda$	lagrangscher Multiplikator
$\lambda$	Einflussgröße Raghava Materialmodell
$\mu$	Einflussgröße Drucker-Prager Materialmodell
$\nu$	Querkontraktionszahl
$\sigma$	Spannungen
$\sigma_h$	hydrostatische Spannung
$\sigma_i \{i \in x, y, z\}$	Spannungen im kartesischen Koordinatensystem
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungskomponenten
$\sigma_e$	effektive Spannung
$\sigma_{Druck}, \sigma_{Zug}$	Materialparameter des Klebstoffs

$\sigma_{init}$	CZM - Spannung bei Schädigungsbeginn
$\Delta\sigma_{Klebschichtdicke}$	Spannungseinfluss durch Variation der Klebschichtdicke
$\sigma_m$	mittlere Spannung
$\sigma_{vM}$	von-Mises-Spannung
$\tau_{ij} \{i = j \in x, y, z\}$	Schubspannungen im kartesischen Koordinatensystem
$\tau_{Schub}$	Materialparameter des Klebstoffs
$\tau_{Gesamt}$	Gesamtregressionskurve Torsionsversuche
$\tau_{Min}$	Min. Regressionskurve Torsionsversuche
$\tau_{Max}$	Max. Regressionskurve Torsionsversuche
$\vartheta$	Verdrehung der Rohrproben
$\gamma$	Gleitungen
$\gamma_{ij} \{i = j \in x, y, z\}$	Gleitung im kartesischen Koordinatensystem

### *Lateinische Symbole*

$a, \Delta a$	Risslänge, Rissfortschritt
$a_1, a_2$	Einflussgröße Schlimmer Materialmodell
$d_{Klebschicht}$	Klebschichtdicke
$l_{gesamt}$	Gesamtlänge der Probenkörper
$r, t, a$	Distanz in entsprechender zylindrischen Koordinate
$x, y, z$	Distanz in entsprechender kartesischen Koordinate
$\Delta x_{Radius}$	Variation Innen- und Außendurchmesser
$A, \Delta A$	Rissfläche, Rissfortschrittsfläche
$\underline{A}$	Gesamtspannungstensor
$\underline{B}$	Kugeltensor des Gesamtspannungstensor
$\underline{C}$	Deviator des Gesamtspannungstensor
$D_i, D_a$	Durchmesser der Rohrprobe innen und außen

$E_{Torsion}$	Aus Torsionsversuchen abgeleitetes E-Modul
$E_{Zug}$	Aus Zugversuchen abgeleitetes E-Modul
$F$	plastisches Potenzial
$F_{vM}, F_{DP}, F_R, F_S$	Fließbedingungen
$F_{Zug}$	Zuglast
$G$	Energiefreisetzungsraten
$G_i \{i \in I, II, III\}$	auftretende Energiefreisetzungsraten
$G_i^k \{i \in I, II, III\}$	kritische Energiefreisetzungsraten
$I, II, III$	Rissöffnungsmodi
$I_1$	erste Invariante des Spannungstensors $\underline{A}$
$I_t$	Torsionsträgheitsmoment
$J_2'$	zweite Invariante des Deviators $\underline{B}$
$M_t$	Aufgebrachtes Drehmoment
$W_t$	Torsionswiderstandsmoment



# 1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat sich der Anwendungsbereich von Faserverbundwerkstoffe in der zivilen Luftfahrt stark erweitert. Dies spiegelt sich in den neusten Flugzeugtypen der großen Flugzeughersteller Boeing und Airbus wieder (Boeing 787 und Airbus A350). Diese Flugzeuge werden zu großen Teilen aus Faserverbundwerkstoffen gefertigt. Insbesondere für primäre Strukturen aus Faserverbundwerkstoffen die sicherheitsrelevant sind für den Betrieb eines Flugzeuges, besteht ein Bedarf an Reparaturmethoden, die an den Werkstoff angepasst sind. Am Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) wird in diesem Zusammenhang das Reparaturverfahren mit geschäfteten Klebreparaturen untersucht. Um ein Reparaturverfahren anwenden zu können, muss neben dem Fertigungsverfahren zur Reparaturdurchführung auch ein geeignetes Auslegungsverfahren entwickelt werden. Für die Auslegung wird die Simulation mittels Finite Elemente Methode (FEM) angewendet. Um bei diesem Auslegungsverfahren das Verhalten des Klebstoffes abzubilden, bedarf es eines Materialmodells für den Klebstoff, sowie entsprechende Materialdaten.

Ziel dieser Arbeit ist es einen Überblick über geeigneten Modellierungsmethoden für hochfeste Klebstoffe zu geben und eine Auswahl für den gegebenen Anwendungsfall mit Filmklebstoffen zu treffen. Auf Basis dieser Auswahl werden vorhandene Testergebnisse ausgewertet, die zur Ermittlung von Materialkennwerten des Klebstoffes durchgeführt wurden.

Bei der Betrachtung von geeigneten Modellierungsmethoden werden sowohl bruchmechanische als auch kontinuumsmechanische Ansätze betrachtet und verglichen. Ausgewählt werden kontinuumsmechanische Modellierungsmethoden und explizit das von-Mises-Materialmodell. Eine Probenform, die alle notwendigen Materialkennwerte für

diese Modellierungsmethode liefert, ist die Zug/Torsion belastete Rohrproben, die weitergehend untersucht wird. In einem ersten Schritt werden bereits durchgeführte Versuche bewertet und die Ergebnisse für die FEM Simulation in Eingangsgrößen umgerechnet. Im nächsten Schritt werden die durchgeführten Versuche mit der ausgewählten Modellierungsmethode und der ermittelten Eingangsgrößen simuliert. Damit wird untersucht, ob die Auswahl für die Auslegung geeignet ist. Da sich bei der Interpretation der gegebenen Versuchsergebnisse deutliche Abweichungen gezeigt haben, werden in einem dritten Schritt ausgewählte Fertigungseinflüsse mit FEM Simulationen untersucht. In einem abschließenden Schritt wird die Geometrie der Rohrproben im Bereich der Klebfuge verbessert, um insbesondere für den Zugbelastungszustand eine möglichst homogene Spannungsverteilung über der Klebungsbreite zu erhalten.

## 2. Simulationsmethoden für Klebverbindungen und deren Charakterisierungsproben

In diesem Abschnitt wird das Klebstoffverhalten unter mechanischer Last und die zwei grundlegenden Simulationsmethoden für Klebverbindungen mit den zugehörigen Charakterisierungsversuchen dargestellt. Abschließend wird in diesem Abschnitt die Auswahl der Simulationsmethode begründet, die für das angestrebte Anwendungsfeld am besten geeignet ist.

### 2.1. Materialverhalten von Klebstoffen

In diesem Abschnitt werden als Einstieg die grundlegenden Eigenschaften von Klebstoffen beschrieben. Zudem wird die unterschiedliche Herangehensweise der im Folgenden näher beschriebenen Simulationsmethoden eingegangen.

Nach Habenicht [21] kann das Materialverhalten eines Klebstoffes mit ausreichender Genauigkeit als isotrop angenommen werden. Zudem ist in Abbildung 2.1 ein näherungsweise linear elastisches Materialverhalten unter geringen Lasten zu erkennen. Mit zunehmender Belastung geht der Werkstoff in den Zustand des Fließens<sup>1</sup> über. Eine ausgeprägte Fließgrenze, wie sie bei einigen Metallen zu finden ist, zeigt sich bei Klebstoffen nicht. Häufig wird als Ersatz für eine Fließgrenze der sogenannte Kniepunkt bestimmt. Dieser Punkt ergibt sich als Schnittpunkt der Winkelhalbierenden

---

<sup>1</sup>Zunehmende Deformation ohne Steigerung der übertragenen Last

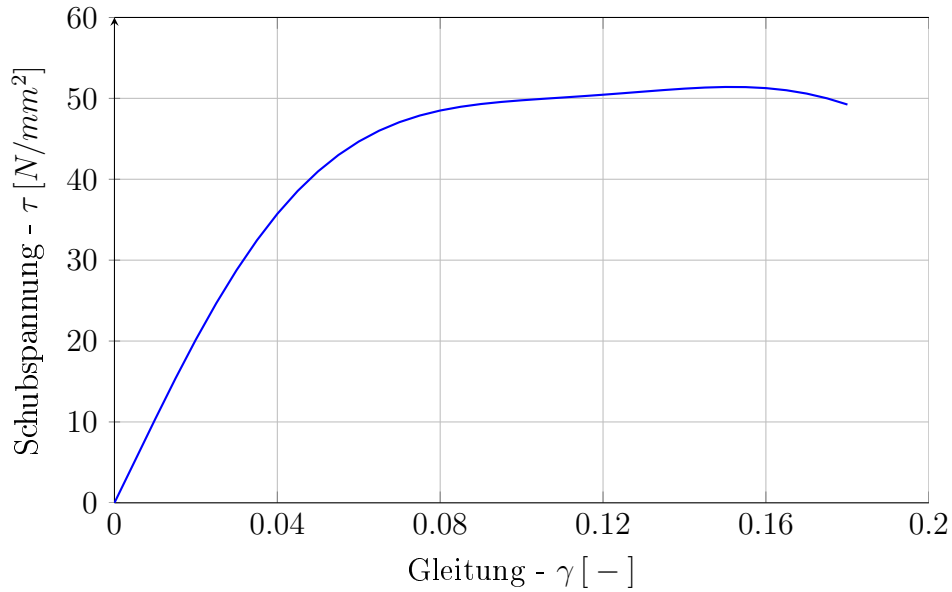


Abbildung 2.1.: Schubspannungs-Gleitungskurve Klebstoff EA9695 abgeleitet aus Ergebnissen in [24]

C zwischen den beiden Tangenten A und B (siehe Abbildung 2.2). Die beiden Tangenten A und B sind dabei an einer Spannungs-Dehnungskurve für den Endpunkt des linear elastischen Verhaltens und den Punkt der Versagenslast zu bestimmen. Weitere Informationen zur Bestimmung dieses Wertes sind in [4] dargestellt.

Wie in [34] und [28] dargestellt wird, ist die Fließgrenze bei Klebstoff abhängig vom Belastungszustand. Insbesondere der später (Abschnitt 3) näher erläuterte hydrostatische Spannungszustand spielt hier eine wichtige Rolle. Ebenfalls abhängig vom Belastungszustand ist die Ausprägung des Fließbereiches. Wie die Versuchsergebnisse in Abschnitt 4 zeigen, tritt bei Schubbelastung ein deutlicherer Fließbereich auf, wohingegen die Zugproben annähernd spröde versagen. Weitere Beispiele für das Verhalten von unterschiedlichen Klebstoffen unter Schubbelastung sind im Federal Aviation Administration (FAA)-Bericht [18] zu finden.

Um das oben beschriebene Materialverhalten von Klebstoffen in Simulationen abbilden zu können, gibt es zwei grundlegende Ansätze. Der erste Ansatz geht dabei von einem homogenen Materialverhalten in der Klebschicht aus (siehe [31]). In diesem Fall kann im Material ein repräsentatives Volumenelement (RVE) definiert werden. An diesem lassen sich die Materialeigenschaften des Klebstoffes mit kontinuumsmechani-



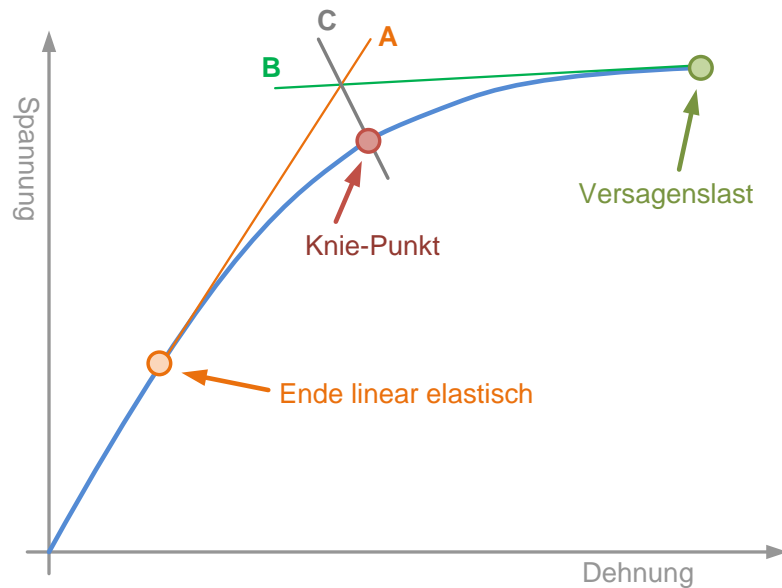


Abbildung 2.2.: Definition des Knie-Punktes nach [4]

schen Methoden beschreiben. Beim zweiten Ansatz wird die Klebschicht als Ganzes betrachtet. Dabei werden Methoden der linearen Bruchmechanik abschnittsweise auf die Klebverbindung angewendet.

## 2.2. Bruchmechanische Ansätze

Im Folgenden werden die Grundlagen der lineare Bruchmechanik beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf der Anwendung in einer Simulationsmethode zur Darstellung des Verhaltens von Klebverbindungen. Im Gegensatz zu den kontinuumsmechanischen Ansätzen sind bruchmechanische Ansätze nicht in der Lage den Klebstoff an sich zu simulieren, sondern nur in Form einer Klebverbindung zwischen zwei Fügepartnern. Auf die Praxisanwendung hat diese Einschränkung wenig Einfluss, da in den seltensten Fällen der Klebstoff an sich simuliert wird, sondern eine Verbindung zwischen Bauteilen.

### 2.2.1. Grundlagen der linearen Bruchmechanik

Der bruchmechanische Ansatz zur Simulation von Klebverbindung basiert auf der linearen Bruchmechanik. In Abbildung 2.3 wird ein Ersatzsystem für die Vorgänge an

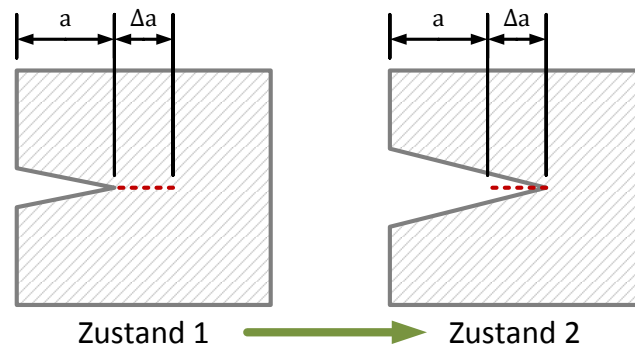


Abbildung 2.3.: Idealisierte Betrachtung des Rissfortschritts - Zustand 1 (Riss entstanden)  $\rightarrow$  Zustand 2 (Riss geöffnet)

der Risspitze dargestellt. Um die Funktionsweise der linearen Bruchmechanik zu beschreiben, müssen zwei Zustände definiert werden. Diese beiden Zustände sind in Abbildung 2.3 dargestellt. „Zustand 1“ ist der Ausgangszustand, der Riss hat sich um die Länge  $\Delta a$  (bzw. um die Fläche  $\Delta A$ ) ausgebreitet, jedoch hat sich dieser noch nicht geöffnet. Beim Übergang von „Zustand 1“ zu „Zustand 2“ öffnet sich der Riss wie in Abbildung 2.3 zu sehen. Beim Übergang zwischen den beiden Zuständen wird eine Energie freigesetzt, die der Energie entspricht, die benötigt würde um den Riss in „Zustand 2“ weiterhin geschlossen zu halten. Bezieht man die frei werdende Energie auf die sich öffnende Fläche  $\Delta A$ , erhält man die Energiefreisetzungsrates für den Risswachstum. Dieser Parameter charakterisiert das Materialverhalten eines Klebstoffes bei bruchmechanischen Ansätzen zur Simulation von Klebverbindungen. Eine genaue Herleitung der linearen Bruchmechanik ist bei Gross [20] nachzulesen. Der zuvor dargestellte Ansatz für die Beschreibung der Rissöffnung bezieht sich auf eine Rissöffnung unter einachsiger Belastung. Um das Öffnungsverhalten eines Risses unter verschiedenen Belastungsarten darstellen zu können, werden drei Rissöffnungsmodi definiert (siehe Abbildung 2.4). Bei den Simulationenmethoden, die in Abschnitt 2.2.2 beschrieben werden, definiert die Kombination der drei Rissöffnungsmodi das Verhalten unter multiaxialer Belastung. Für die Definition und Umsetzung dieser „Mixedmode“ Regeln sei auf die entsprechende Dokumentation der FEM-Software verwiesen z. B. [11].

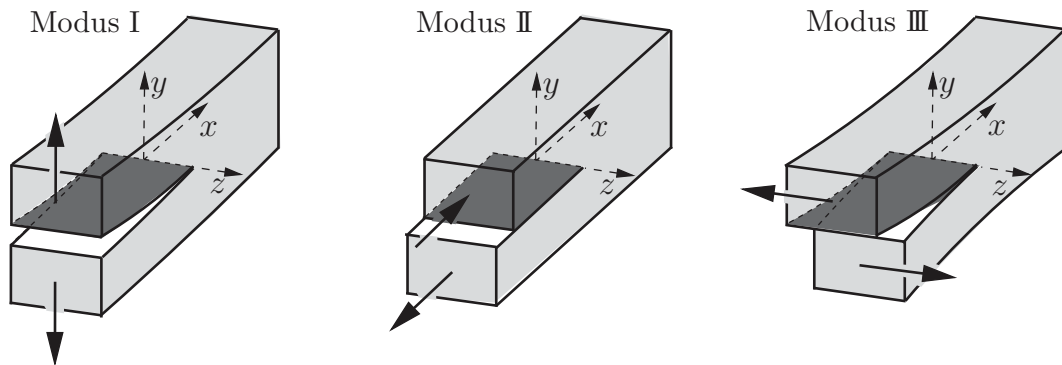


Abbildung 2.4.: Erläuterung der Rissöffnungsarten [20]

### 2.2.2. Simulationmethoden

Anwendung in der FEM finden Ansätze auf Basis der linearen Bruchmechanik in den Simulationmethoden Virtual Crack Closure Technique (VCCT) und Cohesive Zone Modeling (CZM). Diese werden im Folgenden näher beschrieben, wobei sich die Ausführungen auf die Informationen der Abaqus<sup>®</sup> Dokumentation [11] stützen. Bei den folgenden Beschreibungen muss beachtet werden, dass sich die Simulationmethoden immer auf einen lokalen Bereich der Klebeverbindung beziehen, z. B. ein Element oder einen Kontakt von zwei Knoten. Zudem ist zu berücksichtigen, dass insbesondere das CZM nur auf dünne Klebschichten Anwendung findet [11] (im Verhältnis zur Dicke der Fügepartner).

#### *Cohesive Zone Modeling (CZM)*

Bei dem CZM wird das Verhalten einer Klebschicht über die Verschiebung der Fügeflächen zueinander definiert. Die Verschiebungen der Fügeflächen zueinander entsprechen dabei den Rissöffnungsmodi. Entfernen sich die Fügeflächen voneinander, so entspricht dies einer Rissöffnung nach Mode I. Bei einer Parallelverschiebung entspricht dies den Modi II oder III. Die Fügeflächen werden dabei zumeist als obere und untere Fläche eines diskret modellierten Klebschichtelementes definiert.

Das Verhalten der Klebung wird über drei Hauptparameter definiert, die das lokale Klebschichtverhalten von linear-elastisch bis zum Rissfortschritt beschreiben. Diese

drei Parameter sind die Anfangssteifigkeit, die Schadensinitiierungsspannung/-öffnung und die kritische Energiefreisetzungsrate. Zudem kann, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, zwischen verschiedenen Degradationsmodellen unterschieden werden. Betrachtet man Abbildung 2.5 so ist zu erkennen, wie diese Parameter das lokale Klebschichtverhalten beschreiben. Ausgehend vom Ursprung des Spannungs-Rissöffnungsdiagramms ist das linear elastische Anfangsverhalten zu erkennen. Ab der Schadensinitiierung, die durch einen Spannungs- oder Rissöffnungszustand definiert wird ( $\sigma_{init}$ ,  $\delta_{init}$ ), beginnt die Degradation der Klebschichtsteifigkeit. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten die Steifigkeit zu reduzieren, beispielhaft sind hier eine lineare und exponentielle Reduktion dargestellt. In Abbildung 2.5 ist zu erkennen, dass die Steifigkeitsreduktion zu einer Reduktion der übertragenen Spannung auf Null führt. Für die unterschiedlichen Degradationsmethoden ergeben sich die Spannungsnulldpunkte A und B. Die Unterschiede bezüglich des Dehnungszustandes bei welchem der Nullpunkt erreicht wird, ergibt sich durch die als Materialkennwert vorgegeben kritische Energiefreisetzungsrate (wird über Charakterisierungsproben ermittelt). Diese entspricht der Fläche unter der jeweiligen Kurve.

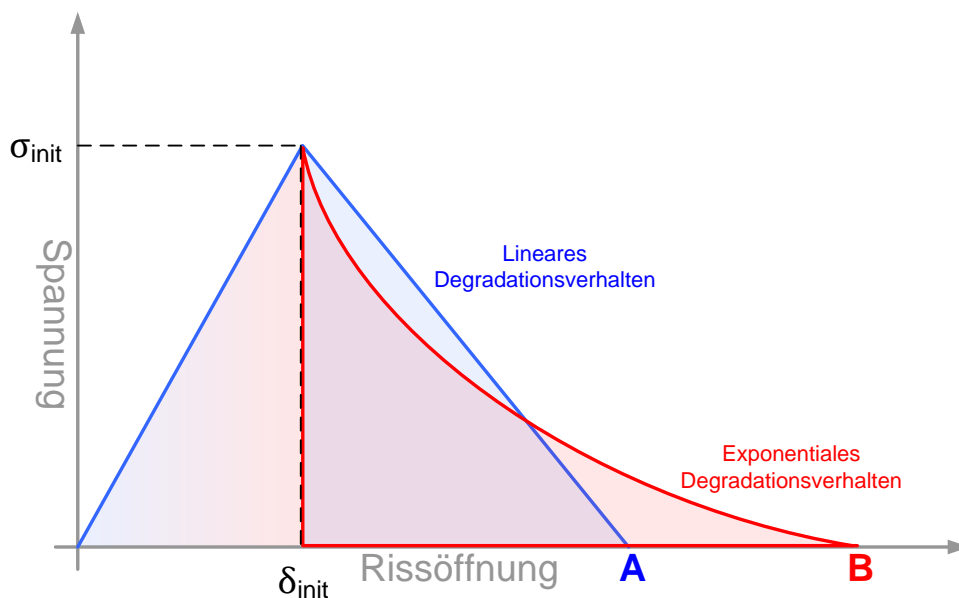


Abbildung 2.5.: Spannungs-Rissöffnungsverhalten bei CZM - unterschiedliche Formen des Degradationsverhaltens

Das zuvor beschriebene Prinzip des CZM gilt sowohl für einachsige als auch multiaxiale Belastungen. Für die multiaxialen Belastungen werden hierzu aus den Materialdaten der einzelnen Rissöffnungsmodi Mixedmode Werte ermittelt. Ein Beispiel für eine solche Mixemode Bedingung ist in Gleichung 2.1 nach Benzeggagh und Kenane [5] gegeben. Dabei steht  $G_i$  für die aktuelle Energiefreisetzungsrate der entsprechenden Moden und  $G_i^k$  für die im Versuch ermittelte kritische Energiefreisetzungsrate. Eine genauere Beschreibung und weitere Methoden mit denen diese Mixedmode Werte ermittelt werden, können in [11] beispielhaft für die Software Abaqus<sup>©</sup> nachgelesen werden.

$$G_{total}^k = G_I^k + (G_{II}^k - G_I^k) \left( \frac{G_I + G_{II}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta \quad (2.1)$$

### *Virtual Crack Closure Technique (VCCT)*

Die VCCT basiert auf dem gleichen Ansatz wie das CZM. Wird die kritische Energiefreisetzungsrate erreicht, so breitet sich der Riss aus. Die Ermittlung der aktuellen freigesetzten Energie geschieht allerdings nicht zwischen den Fügeflächen, sondern direkt an der Rissfront. Um dieses in einer FEM-Software darzustellen, muss der Rissverlauf explizit innerhalb der Klebschicht modelliert werden. Dazu werden die zwei Flächen (gleichförmig vernetzt), die sich nach der vollständigen Rissausbreitung in der Klebschicht bilden, durch eine Kontaktbedingung gekoppelt. Wird an der Rissfront die kritische Energiefreisetzungsrate erreicht, so wird dort die Kontaktbedingung gelöst. Diese Simulationemethode bildet damit keine Entfestigung der Verbindung ab. Sie ist damit eher für die Darstellung von sprödem Materialverhalten geeignet.

### **2.2.3. Charakterisierungsproben**

Sowohl CZM als auch VCCT basiert auf der kritischen Energiefreisetzungsrate eines Werkstoffes, so dass diese für die unterschiedlichen Rissöffnungsmodi (Abbildung 2.5) bestimmt werden müssen. Für die Rissöffnungsmodi I und II gibt es bereits etablierte Versuche, Double-Cantilever Beam (DCB) [14] und End-Notched Flexure (ENF) [15]. Für den Mode III hat sich bisher noch keine Testkonfiguration etabliert. Bei allen Ver-

suchen zur Ermittlung der Energiefreisetzungsrate wird im Test die Rissausbreitung gemessen. Hierfür ist die Last langsam aufzubringen, da der Rissfortschritt mit optischen Mitteln gemessen wird. Im Falle der DCB Proben muss der Versuch permanent überwacht werden, da sich der Riss nur bis zu einem gewissen Grad ausbreiten soll. Grund hier für ist, dass die Probe innerhalb einer Prüfsérie als ENF Probe weiter genutzt wird. Im Allgemeinen kann die Messung der Energiefreisetzungsrate damit als langwierig bezeichnet werden. Ein weiterer kritischer Punkt bei der Bewertung dieser Versuche ist die beschriebene optische Messung. Die Qualität der Messung wird dabei stark von der Auflösung beeinflusst, mit der die Rissspitze ermittelt werden kann. Zudem wird die Qualität dadurch beeinflusst, dass die Messung nur an den Außenseiten der Probe erfolgt, die reale Form der Rissfront fließt nicht in die Ermittlung der Energiefreisetzungsrate mit ein. Speziell für Prüfung von Energiefreisetzungsraten an carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) Laminaten ergibt sich die Schwierigkeit, dass der Riss sich unter Umständen nicht innerhalb der Klebschicht ausbreitet. Eine Ausbreitung des Risses innerhalb der an die Klebschicht angrenzenden Lagen ist nicht untypisch [33].

### 2.3. Kontinuumsmechanischer Ansatz

Bei diesem Ansatz zur Simulation von Klebverbindungen werden kontinuumsmechanische Ansätze<sup>2</sup> genutzt um das Materialverhalten abzubilden. Im Gegensatz zu den Bruchmechanik basierten Simulationsmethoden gelten die kontinuumsmechanischen Ansätze allgemein für den Werkstoff Klebstoff und nicht speziell für Klebverbindungen. Da sich diese Arbeit nur mit statischen Belastungen beschäftigt, wird auf die Beschreibung von viskoelastischen und viskoplastischen Effekten verzichtet. Für dynamische Belastungen müssen diese jedoch berücksichtigt werden (z. B. [8]).

---

<sup>2</sup>„Die Kontinuumsmechanik ist eine phänomenologische Feldtheorie. Ausgehend von beobachteten Phänomenen und experimentellen Erfahrungen werden mathematische Modelle für das mechanische Verhalten der Materie formuliert. Dabei wird vielfach Phänomenologie mit einem makroskopischen Beobachtermassstab gleichgesetzt. ...“ Altenbach-Kontinuumsmechanik, Seite 7 [1]

### 2.3.1. Grundlegender Aufbau von elastisch-plastischen Materialmodellen

In diesem Abschnitt wird der grundlegende Aufbau von elastisch-plastischen Materialmodellen für die kontinuumsmechanische Betrachtung von Klebstoffen dargestellt. Er teilt sich in die Komponenten Fließbedingung, Verfestigungsgesetz und Fließregel [20]. Die einzelnen Komponenten werden anhand eines einachsigen Spannungs-Dehnungsverhaltens in Abbildung 2.6 erläutert.

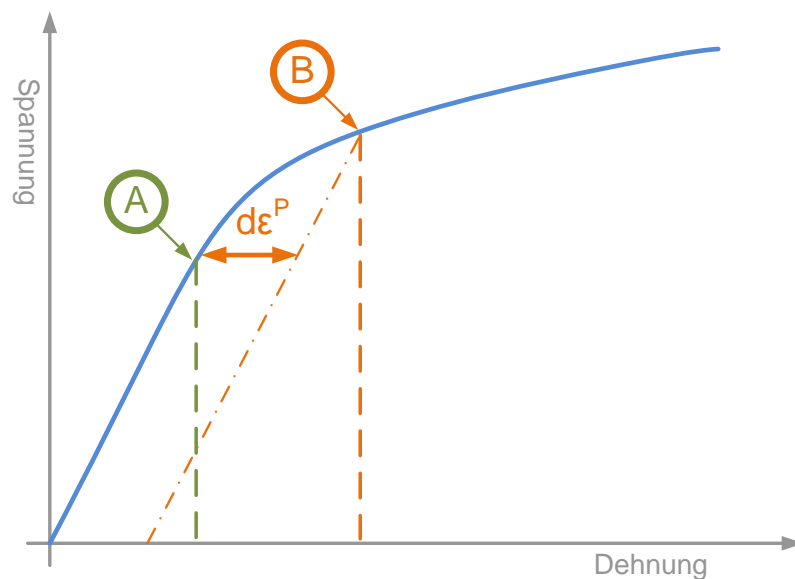


Abbildung 2.6.: Beschreibung des plastischen Anteils des Verzerrungssinkrementes  $d\varepsilon^p$  an Hand einer exemplarischen Spannungs-Dehnungskurve

#### *Fließbedingung*

Die Fließbedingung definiert unter welchem Belastungszustand ein Material zu fließen beginnt (Punkt A in Abbildung 2.6). Im Gegensatz zu Metallen haben die meisten Klebstoffe die Eigenschaft, dass sie auch unter hydrostatischer Belastung zu fließen beginnen [30]. Die Darstellung von Fließbedingungen im dreidimensionalen Hauptspannungsraum stellt eine Fläche (Fließortfläche) dar. Für Spannungszustände innerhalb dieser Fläche verhält sich das Material rein elastisch. Liegt der Spannungszustand auf der Fläche, treten zusätzlich zur elastischen auch plastische Verformung auf.

### *Fließregel*

Die Fließregel definiert die Größe und Orientierung des plastischen Anteils des Verzerrungsinkrementes  $d\varepsilon^p$  (Gleichung 2.2 und Abbildung 2.6), der auftritt wenn die Fließbedingung erfüllt ist. Grundlage hierfür ist ein Potenzial (plastisches Potenzial nach [31]). Projiziert dieses plastische Potenzial  $F$  die gleiche Fläche im Spannungsraum wie die Fließbedingung, so spricht man von einer assoziierten Fließregel. In diesem Fall ist die Orientierung des plastischen Verzerrungsinkrementes immer normal zur Fließortfläche. Stimmen die Flächen nicht überein, so spricht man von einer nicht-assozierten Fließregel. In diesem Fall besteht kein zwangsläufiger Zusammenhang zwischen dem plastischen Verzerrungsinkrementen und der Fließbedingung (Fließortfläche). Für Klebstoffe ist nach Crocker [10] und Schlimmer [30] von einer nicht-assozierten Fließregel auszugehen.

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (2.2)$$

Die Fließregel wird durch die allgemeine Gleichung 2.3 ausgedrückt [20]. Dabei ist  $d\lambda$  ein Lagrangescher Multiplikator für dessen umfangreiche Herleitung auf Altenbach [1] und Gross [20] verwiesen wird.

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.3)$$

### *Verfestigungsgesetz*

Das Verfestigungsgesetz beschreibt die Änderung der Fließbedingung sobald sie erfüllt wurde, also ein Spannungszustand erreicht wurde der auf der Fließortfläche liegt. Es gibt zwei Arten des Verfestigungsgesetzes die für diesen Anwendungsfall in der FEM Verwendung finden, isotrop und kinematisch (Abbildung 2.7). Beim isotropen Verfestigungsgesetz wird die Fließortfläche in alle Richtungen gleichmäßig ausgeweitet. Bei der kinematischen Methode wird das eingeschlossene Volumen der Fließortfläche nicht verändert, sie wird lediglich verschoben. Mit der kinematischen Methode lässt sich z. B.



der Bauschingereffekt<sup>3</sup> beschreiben.

Auf die Details der unterschiedlichen Materialmodelle wird in Abschnitt 3 näher eingegangen.

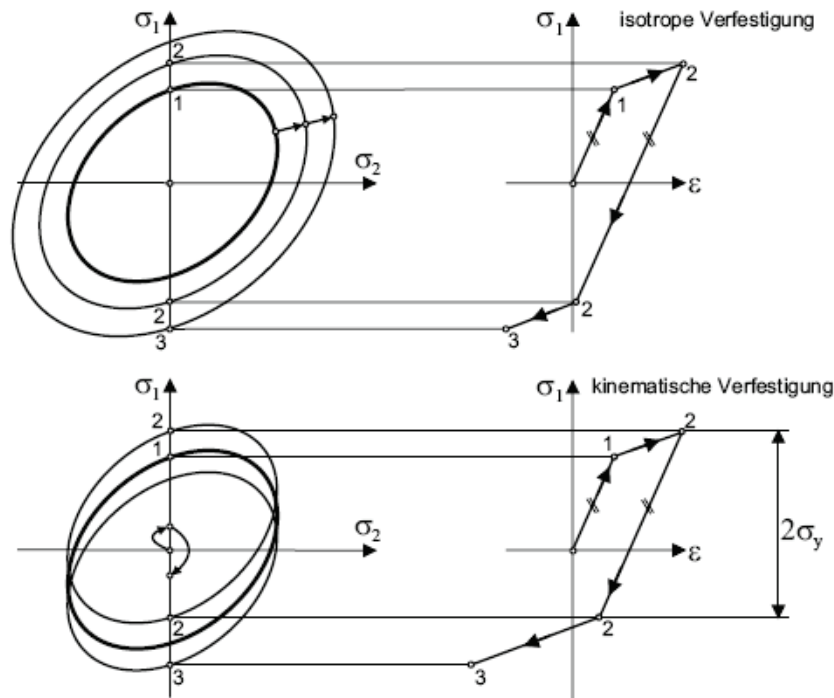


Abbildung 2.7.: Plastisches Ver- und Entfestigungsverhalten [25] (nach [32]) - Fließkurve im Hauptspannungsraum (links), Spannungs-Dehnungsverhalten (rechts)

### 2.3.2. Charakterisierungsproben

Ausgangsparameter für die kontinuumsmechanischen Materialmodelle sind im Versuch ermittelte Spannungs-Dehnungs-Kurven unter ein- oder mehrachsiger Belastung. Vier grundlegende Prüfverfahren sollen hier im Folgenden beschrieben werden.

#### *Uniaxiale Zugprobe*

Dieser Probentyp (Abbildung 2.8, links) wird genutzt, um die reinen Materialeigenschaften eines Klebstoffes zu testen. Die Proben bestehen dabei rein aus dem Kleb-

<sup>3</sup>Richtungsabhängige Änderung der Elastizitätsgrenze nach einer plastischen Verformung

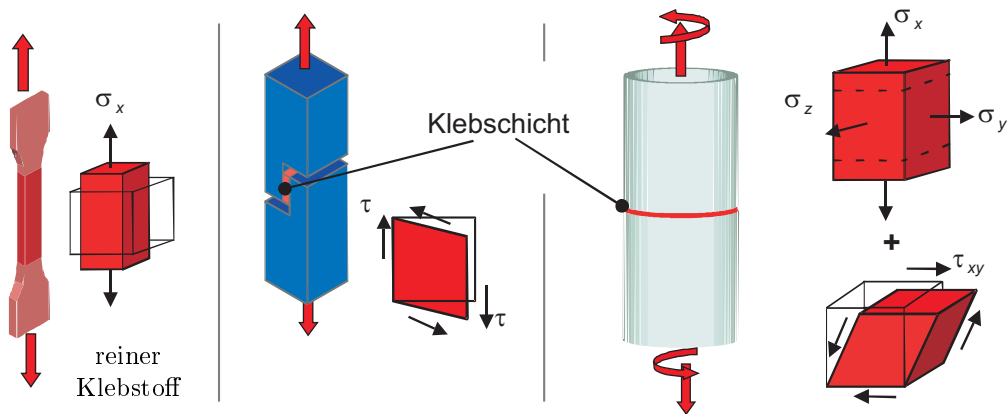


Abbildung 2.8.: Übersicht gängiger Probentypen [31]: Uniaxiale Zugprobe (links), Dicke Zugscherprobe (mitte), Rohrprobe (rechts)

stoffmaterial. Dadurch wird bei diesen Proben die Querkontraktionsbehinderung nicht berücksichtigt, die bei dünnen Klebschichten zwischen steifen Fügepartnern auftritt (siehe Habenicht [21]).

Mit diesem Probentyp kann für Zugbelastungen das Spannungs-Dehnungs-Verhalten ermittelt werden. Aus diesem wiederum lässt sich direkt der Anfangs-E-Modul, der Knie-Punkt und die Versagenslast bzw. -dehnung bestimmen. Über die gemessenen Querschnittsreduktion kann die Querkontraktionszahl ermittelt werden.

Der schwierigste Anteil des Probenbaus ist die Erzeugung einer porenfreien Ausgangsplatte mit gewünschter Dicke. Aus dieser Platte werden die einzelnen Proben mittels zerspanender Bearbeitungsverfahren hergestellt. Die notwendige Versuchstechnik ist mit einer Zugprüfmaschine und Extensometern zur Querkontraktionsmessung wenig aufwendig.

### *Dicke Zugscherprobe*

Bei diesem Probentyp [4] zur Ermittlung des Schubspannungs-Gleitungs-Verhaltens, wird die Querkontraktionsbehinderung dünner Klebschichten berücksichtigt. Wie in Abbildung 2.8 (mitte) zu erkennen, besteht die Probe aus zwei, im Verhältnis zur Klebschicht, dicken metallischen Fügepartnern. Die Wahl dieser Probenform soll das Auftreten von Lasten normal zu den Fügeflächen verhindern, indem die Auswirkung der

exzentrischen Lasteinleitung minimiert wird. Auch die Eigendehnung der Fügepartner wird durch ihre dicke Bauform reduziert. Damit lässt sich mit dieser Probengeometrie das Verhalten unter nahezu reiner Schubbelastung ermitteln. Diese Probenform wird auch an der Hochschule Landshut [29] eingesetzt um dehnratenabhängige Materialkennwerten zu ermitteln.

Dieser Probentyp ermöglicht die Ermittlung des Schubspannungs-Gleitungs-Verlaufs eines Klebstoffs. Aus diesem kann das Anfangs-Schubmodul, der Knie-Punkt und der Versagenszustand (Schubspannung oder Scherung) ermittelt werden.

Auch bei diesen Proben ist die Fertigung der Proben der kritischste Arbeitsschritt. Wie bei den uniaxialen Proben muss darauf geachtet werden, dass porenfreie Klebungen erzeugt werden. Ob dies gelungen ist, kann erst nach Durchführung der Prüfung festgestellt werden. Die Parallelität der Fügepartner kann bei diesem Probentyp vergleichsweise einfach über Fügevorrichtungen sichergestellt werden. Die notwendige Versuchstechnik entspricht mit Extensometer (komplexere Bauform da mehrachsige Messung) und Zugprüfmaschine dem der uniaxialen Zugproben. Problematischer ist bei dieser Probenform, und allgemein bei der Prüfung von dünnen Klebverbindungen, die geringen Verschiebungen der Fügepartner zueinander. Die Messgeräte müssen sehr fein auflösend sein. Die Messergebnisse können dann jedoch leicht durch Störsignale verfälscht werden.

#### *Arcan Proben*

Dieser Probentyp ist zur Ermittlung von Materialparametern unter multiaxialer Last geeignet und nach dem Entwickler M. Arcan benannt [2]. Abwandlungen dieser Probenform, die in ihrer Grundform zur Materialdatenermittlung von Faserverbundlaminaten entwickelt wurde, werden auch zur Ermittlung von Klebstoff Materialeigenschaften verwendet [34] [9]. In Abbildung 2.9 ist eine Prinzipskizze zur Funktionsweise der Probe dargestellt. In der Mitte befindet sich die Probe aus Fügepartner und Klebschicht. Diese ist in die Prüfvorrichtung eingespannt. Je nach Wahl des Lochpaares, an dem die Prüfvorrichtung in eine Zug/Duck-Prüfmaschine eingespannt wird, ergibt sich eine bestimmte Lastkombination oder einachsige Last. Beim Vergleich zwischen klassischer

Arcan Prüfung und modifizierter (Abbildung 2.9(a) zu (b)) zeigt die modifizierte ein breiteres Spektrum an Lastkombinationen. Sie wurde in [9] entwickelt, um auch unter Drucklasten testen zu können. Die bei [9] beschriebene Prüfvorrichtung sowie ein Probekörper sind in Abbildung 2.10 dargestellt.

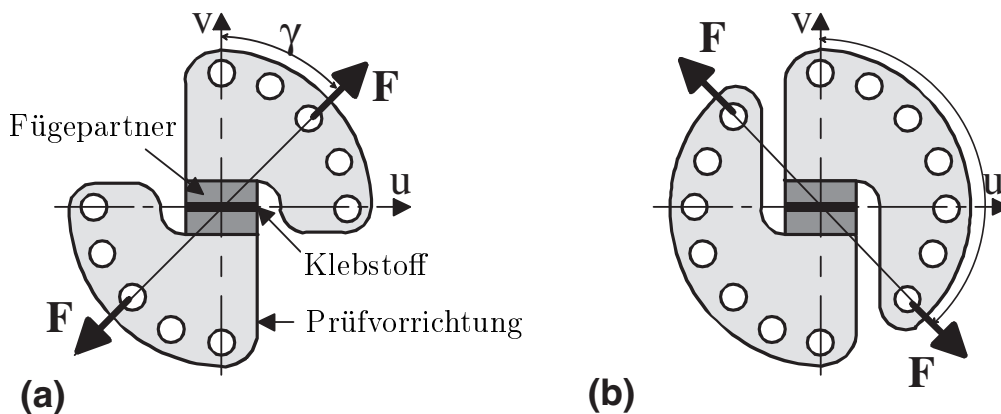
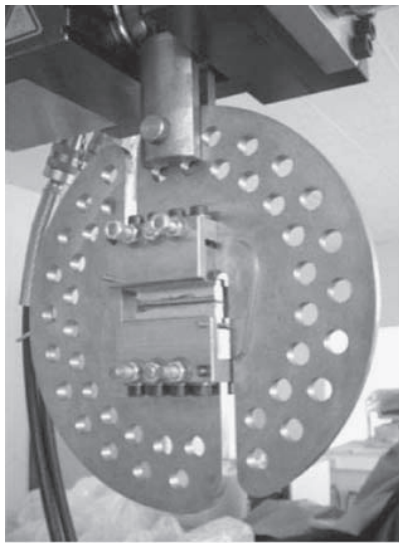


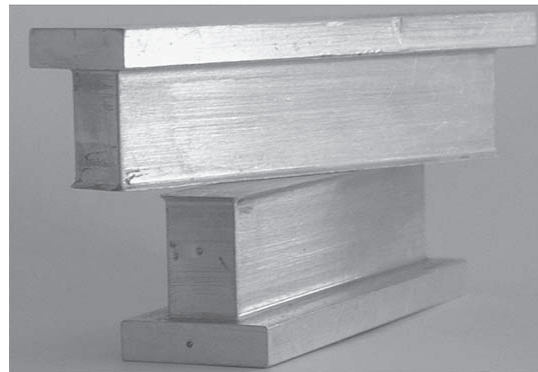
Abbildung 2.9.: Prinzipskizze für Arcan Probe [9] - (a) klassische Arcan Prüfung (b) modifizierte Version

Mit dieser Probenform können Spannungs-Dehnungs bzw. Schubspannungs-Gleitungs-Kurven ermittelt werden, je nach Belastung des Probekörpers. Aus diesen Kurven können entsprechend Anfangs-Schub- und E-Module, die Knie-Punkte und die Belastungszustände bei Versagen ermittelt werden.

Wie schon bei den zuvor beschriebenen Probentypen muss auch hier auf die porenfrei Erzeugung der Klebefügung geachtet werden. Die weitere Komplexität der Prüfkörper ist von der gewählten Prüfvorrichtung abhängig und wie die Prüfkörper in diese eingespannt werden. Bei der von Hartung [22] verwendeten Prüfvorrichtung zeigt sich dabei, dass die Proben mit hoher Genauigkeit von wenigen hundertstel Millimetern gefertigt werden müssen. Dieser Fertigungsaufwand führt zu hohen Kosten. Es gibt jedoch in der Literatur weitere Vorrichtungsarten die dem Grundkonzept der Arcan Proben folgen (z.B. [34], [9]), zu diesen sind keine Informationen zum Fertigungsaufwand bekannt. Bezüglich der Versuchstechnik benötigen diese Test neben der Prüfvorrichtung lediglich eine Zug/Druck-Prüfmaschine. Der Bedarf an weiterer Messtechnik ist abhängig von der gewählten Testvorrichtung. Diese Proben unterliegen dabei der gleichen Pro-



(a)



(b)

Abbildung 2.10.: Prüfvorrichtung (a) und Probe (b) für modifizierte Arcan Probe bei [9]

blemantik durch die dünne Klebschicht, wie bei den dicken Zugscherproben beschrieben.

### *Rohrproben*

Eine weitere Probenform, die ein Testen von Klebstoffen unter multiaxialer Belastung ermöglicht, ist die Rohrprobe [16]. Bei dieser Probenform werden zwei Metallrohre stumpf mit einander verklebt, wie in Abbildung 2.8 (rechts) gezeigt. Die Proben können auf Zug/Druck, Schub oder Kombinationen belastet werden, um entsprechende Materialkennwerte zu ermitteln. Bezüglich der Schubbelastung der Klebschicht kann unter Torsionslast eine homogene Schubbelastung der Klebschicht erzeugt werden. Randeffekt in Lastrichtung, wie sie bei Arcan und dicken Zugscherproben auftreten, sind nicht vorhanden.

Wie bei den Arcan Proben können mit diesem Probentyp Spannungs-Dehnungs bzw. Schubspannungs-Gleitungs-Kurven ermittelt werden und die entsprechenden Parameter abgeleitet werden.

Auch bei den Rohrproben muss auf die Porenfreiheit der Klebschicht geachtet werden. Zudem muss die Parallelität der beiden Rohrstücke eingehalten und gleichzeitig

die Klebschichtgüte über der gesamten Fügefläche gewährleistet werden. Für diese Probenform wird eine spezielle Zug/Druck-Torsionsprüfmaschine benötigt. Bezüglich der Messung treten auch hier die beschriebenen Probleme der kleinen Verschiebungen auf. Diese Problematik wird durch die Aufzeichnung einer tangentialen Verformung unter Torsionslast noch verstärkt.

### 2.4. Auswahl einer Modellierungsmethode

In diesem Abschnitt wird erläutert, welche Modellierungsmethode im weiteren betrachtet wird. Ausschlaggebend für diese Auswahl ist insbesondere die Zielsetzung des Projektes CAIRE im Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo), welches den Anstoß für diese Arbeit gegeben hat. In diesem Projekt wird vom DLR die Auslegung/Dimensionierung<sup>4</sup> von geschäfteten Klebpreparaturen untersucht. Aus diesem Ziel ergeben sich zwei Anforderungen an eine zu wählende Modellierungsmethode des Klebstoffes.

1. Simulation des Materialverhaltens im auslegungsrelevanten Lastbereich
  - a) Kein Rissausbreitung
  - b) Dezidierte Klebschichtbetrachtung
2. Einfache und allgemeingültige Materialdatenermittlung
  - a) Nicht abhängig von der Fügeart (Überlappung, Schäftung,...)
  - b) Nicht abhängig vom Fügepartner (insbesondere dessen Materials)

Diese Anforderungen gelten auch für diese Arbeit, da ihre Ergebnisse in das zuvor genannte Projekt mit einfließen sollen. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die Wahl einer kontinuumsmechanischen Modellierungsmethode. Wie zuvor beschrieben sind kontinuumsmechanische Methoden mit dem entsprechenden Materialmodell, welches im folgenden Abschnitt 3 ausgewählt wird, in der Lage das Materialverhalten des Klebstoffes bis zum Bruch bzw. Rissbeginn abzubilden. Dabei kann die Klebschicht dezidiert, auch mit mehreren Elementen über der Klebschichtdicke, untersucht werden.

---

<sup>4</sup>Vergleich zwischen auftretendem und zulässigen Spannungs- bzw. Dehnungszustand einer Struktur

Die ermittelten Materialdaten für diese Modellierungsmethode sind allgemein gültig für den Klebstoff und unabhängig vom Material der Fügepartner (solange deutlich steifer als Klebstoff - Querkontraktionsbehinderung).

Unabhängig von den Anforderungen des Projektes, in das die hier erlangten Ergebnisse einfließen, führen auch die Anforderungen der Ziele dieser Arbeit zur Wahl einer kontinuumsmechanischen Methode. Zum einen sollen im Verlauf dieser Arbeit Rohrproben untersucht werden, deren ermittelten Daten als Eingangsgrößen für kontinuumsmechanische Methoden dienen. Daher ist es notwendig, die gemessenen Daten auch mit den entsprechenden Simulationsmethoden zu überprüfen. Zum anderen hat die Untersuchung von Arnaud [3] gezeigt, dass für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu untersuchenden Problemstellungen eine diskrete und dabei sehr fein vernetztes FE-Modell notwendig ist. Eine solche Betrachtung der Klebschicht ist mit einer bruchmechanischen Methode nicht möglich.





## 3. Materialmodelle zur FEM

### Simulation von Klebstoffen

In diesem Abschnitt werden die in der Literatur am verbreitetsten kontinuumsmechanischen Materialmodelle für Klebstoffe dargestellt. Der wichtigste Unterschied zwischen den dargestellten Materialmodellen ist dabei das Fließverhalten in der Nähe des hydrostatischen Spannungszustandes. Dieser Unterschied ist am anschaulichsten an den Fließflächen zu erkennen. Diese werden in den folgenden Abschnitten im Hauptspannungsraum dargestellt. Zunächst wird jedoch in Abschnitt 3.1 auf die wichtigsten kontinuumsmechanischen Grundlagen eingegangen.

#### 3.1. Kontinuumsmechanische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden kontinuumsmechanischen Ansätze dargestellt, die zur Definition der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Materialmodelle notwendig sind [31]. Für die Beschreibung wird beim Klebstoff von einem isotropen und homogenen Werkstoff ausgegangen. Fertigungsbedingte Fehlstellen in der Klebung werden hierbei nicht berücksichtigt. Unter dieser Annahme kann aus der Klebschicht ein RVE betrachtet werden, welches mit einem neun Komponenten (sechs unabhängige) umfassenden Spannungszustand belastet wird. In Gleichung 3.1 ist dieser Spannungszustand dargestellt. Die Matrix  $\underline{A}$  beschreibt dabei den gesamten Spannungszustand. Dieser lässt sich nach Schlimmer [31] in einen hydrostatischen Anteil  $\underline{B}$  (Kugeltensor) und den deviatorischen Anteil  $\underline{C}$  (Deviator) zerlegen. Der hydrostatische Anteil beschreibt dabei den reinen Volumenänderungsanteil, wohingegen der

deviatorische Anteil die Gestaltänderung beschreibt.

$$\underline{A} = \underline{B} + \underline{C} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{Zug} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{bmatrix}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (3.2)$$

Ein reiner hydrostatischer Spannungszustand, auf den später häufiger Bezug genommen wird, tritt dann auf, wenn die Bedingungen in Gleichung 3.3 erfüllt sind. In diesem Fall wird der deviatorische Anteil des Spannungstensors zu null und es bleibt ein reiner hydrostatischer Anteil.

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma_m \quad \text{und} \quad \tau_{ij} = 0 \quad (3.3)$$

Die Fließbedingungen werden im Folgenden im Hauptspannungsraum definiert. Aus dem Spannungstensor  $\underline{A}$  lässt sich unter anderem die Invariante<sup>1</sup>  $I_1$  ableiten. Diese Invariante bildet zusammen mit einer zweiten Invariante  $J'_2$ , die sich aus dem deviatorischen Anteil ableiten lässt, die grundlegenden Parameter für die folgenden Materialmodelle (Fließbedingungen).

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \hat{=} \text{Hauptspannungen}$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3.4)$$

$$J'_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3.5)$$

---

<sup>1</sup>Vom Koordinatensystem unabhängige Anteile eines Spannungstensors

## 3.2. Materialmodell nach von Mises

Die Fließbedingung nach von Mises [26] wurde zur Betrachtung von metallischen Werkstoffen entwickelt. Da diese unter einem reinen hydrostatischen Spannungszustand zu meist keine plastische Verformung erfahren, wird diese in der Fließbedingung nicht berücksichtigt. Trotz dieser Einschränkung findet diese Fließbedingung in unterschiedlichen Veröffentlichungen für Klebstoffe Anwendung, bzw. wird zum Vergleich herangezogen (siehe z.B. [7], [10], [12], [34]).

### 3.2.1. Fließbedingung

Die Fließbedingung  $F_{vM}$  nach von Mises definiert sich nach Gleichung 3.6 [10], dabei ist  $\sigma_{Zug}$  die Fließspannung unter Zug.

$$F_{vM} = \sqrt{3J_2'} - \sigma_{Zug} = 0 \quad (3.6)$$

### 3.2.2. Eingangsparmeter

Als Eingangsparmeter wird für das von-Mises-Materialmodell lediglich eine Spannungs-Dehnungs-Kurve benötigt. Dabei kann entweder direkt auf eine in Zugversuchen ermittelte Kurve zurück gegriffen werden oder eine Schubspannungs-Gleitungs-Kurve umgerechnet werden. Die Umrechnung der Schubspannung erfolgt dabei über die effektive Spannung oder Vergleichsspannung (nach von Mises). Die Gleichung lautet:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_x\sigma_z - \sigma_y\sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (3.7)$$

Bei reiner Schubspannung reduziert sich die Gleichung zu:

$$\sigma_e = \sqrt{3}\tau_{xy} \quad (3.8)$$

Die Umrechnung der Gleitung erfolgt auf ähnlichem Weg mit der effektiven oder

Vergleichsdehnung [20]:

$$\varepsilon_e = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 - \varepsilon_x \varepsilon_y - \varepsilon_x \varepsilon_z - \varepsilon_y \varepsilon_z + \frac{3}{4} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2)} \quad (3.9)$$

Für reine Gleitung reduziert sich die Gleichung auf:

$$\varepsilon_e = \sqrt{\frac{\gamma_{xy}^2}{3}} \quad (3.10)$$

## 3.3. Materialmodell nach Drucker-Prager

Diese Fließbedingung wurde von Drucker und Prager [17] für die Betrachtung von bodenmechanischen<sup>2</sup> Effekten entwickelt. Durch seine Eigenschaft den Fließbeginn auch unter hydrostatischen Lasten zu definieren, findet diese Fließbedingung auch bei der Betrachtung von Klebstoffen Anwendung (siehe z. B. [7], [10], [12], [34]).

### 3.3.1. Fließbedingung

Die Beschreibung des Fließbedingung für Drucker-Prager  $F_{DP}$  bezieht sich auf die Formulierung in [10]. Die dort dargestellten Zusammenhänge beziehen sich auf die Notation die in der FEM-Software Abaqus<sup>©</sup> verwendet werden. Dort ist die Fließbedingung definiert zu:

$$q = d + p \tan \beta \quad (3.11)$$

$$q = \sqrt{3J_2'} \quad ; \quad d = \sqrt{3}\tau_{Schub} \quad ; \quad p = -\frac{1}{3}I_1 \quad ; \quad \tan \beta = \mu \quad (3.12)$$

Wird die Gleichung durch die Invarianten  $I_1$  und  $J_2'$  ausgedrückt, so ergibt sich die folgenden Schreibweise:

$$F_{DP} = \sqrt{3J_2'} - \sqrt{3}\tau_{Schub} + \frac{1}{3}I_1\mu = 0 \quad (3.13)$$

---

<sup>2</sup>Mechanische Beschreibung des Verhaltens von Böden z. B. Baugrund

Der Parameter  $\mu$  kann dabei auf drei mögliche Arten definiert werden. Unterschieden wird dabei welche Eingangsdaten vorhanden sind. Die folgenden drei Gleichungen unterscheiden sich dadurch, welche Fließspannungen,  $\sigma_{Zug}$  - Zug,  $\sigma_{Druck}$  - Druck oder  $\tau_{Schub}$  - Schub gegeben sind.

$$\mu = 3 \left[ \left( \frac{\sqrt{3}\tau_{Schub}}{\sigma_{Zug}} \right) - 1 \right] \quad (3.14)$$

$$\mu = 3 \left[ 1 - \left( \frac{\sqrt{3}\tau_{Schub}}{\sigma_{Druck}} \right) \right] \quad (3.15)$$

$$\mu = 3 \frac{[(\sigma_{Druck}/\sigma_{Zug}) - 1]}{[(\sigma_{Druck}/\sigma_{Zug}) + 1]} \quad (3.16)$$

Die drei Fließspannungen müssen sich dabei auf die gleiche effektiven plastische Dehnung (Gleichung 3.17) beziehen. Die mathematischen Beziehungen dazu sind wie folgt definiert (mit Gleichung 3.9):

$$\varepsilon_e^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p)^2 + (\varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p)^2 + (\varepsilon_3^p - \varepsilon_1^p)^2} \quad (3.17)$$

$$\sigma_e \varepsilon_e^p = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^p \quad (3.18)$$

Bezogen auf die hier angegebenen Fließspannungen ergibt sich damit:

$$\sigma_e \varepsilon_e^p = \sigma_{Zug} \varepsilon_{Zug}^p = \sigma_{Druck} \varepsilon_{Druck}^p = \tau_s \frac{1}{2} \gamma_s^p \quad (3.19)$$

### 3.3.2. Eingangsparameter

Für das Drucker-Prager Materialmodell wird die selbe Spannungs-Dehnungs-Kurve benötigt wie beim von Mises Modell. Zusätzlich sind Fließspannungen für eine weitere Belastungsrichtung notwendig, um den Parameter  $\mu$  zu bestimmen. Somit sind zwei einachsige Materialversuche notwendig, um die benötigten Materialdaten zu ermitteln. Rohrproben und Arcan-Proben sind in der Lage beide Eingangsparameter mit einem Probenotyp zu ermitteln.

## 3.4. Materialmodell nach Raghava

Die Fließbedingung nach Raghava [6] wird in Abaqus<sup>®</sup> auch als exponentiell Drucker-Prager bezeichnet. Diese Bedingung findet beispielsweise Anwendung in [7], [10], [12] und [35].

### 3.4.1. Fließbedingung

Auch bei der Beschreibung der Fließbedingung nach Raghava  $F_R$  wird auf die Notation aus [10] zurückgegriffen. In Abaqus<sup>®</sup> wird die folgende Formulierung genutzt:

$$aq^2 = p + p_1 \quad (3.20)$$

$$a = \frac{1}{3\sigma_{Zug}(\lambda - 1)} \quad ; \quad p_1 = a\lambda\sigma_{Zug}^2 \quad (3.21)$$

Diese lässt sich wiederum mit den Invarianten  $I_1$  und  $J'_2$  (mit Gleichung 3.12 und 3.21) wie folgt schreiben:

$$F_R = 3J'_2 - \lambda\sigma_{Zug}^2 + (\lambda - 1)\sigma_{Zug}I_1 = 0 \quad (3.22)$$

Dabei ist  $\lambda$  in Abhängigkeit der gegebenen Fließspannungen:

$$\lambda = \frac{\sigma_{Druck}}{\sigma_{Zug}} \quad (3.23)$$

$$\lambda = \frac{\sigma_{Druck}^2}{3\tau_{Schub}^2} \quad (3.24)$$

$$\lambda = \frac{3\tau_{Schub}^2}{\sigma_{Zug}^2} \quad (3.25)$$

Auch hier gilt wie bei Drucker-Prager, dass die Fließspannungen  $\sigma_{Zug}$  - Zug,  $\sigma_{Druck}$  - Druck oder  $\tau_{Schub}$  - Schub sich auf eine effektive plastische Dehnung beziehen.

### 3.4.2. Eingangsparmeter

Für das Raghava Materialmodell werden die gleichen Materialparameter benötigt, wie für das Drucker-Prager Modell.

## 3.5. Materialmodell nach Schlimmer

Die bisher beschriebenen Materialmodelle wurden nicht explizit für Klebstoffe entwickelt. Schlimmer hat sich bei seinem Modell ausschließlich auf Klebstoffe fokussiert. Die gesamte Berechnungsmethode und Herleitung des Modells wird in [30] dargestellt. Weitere Quellen zu diesem Modell sind [31] und [27].

### 3.5.1. Fließbedingung

Schlimmer zeigt in [30] das Verhalten von Klebstoffen auf und leitet daraus sein Materialmodell ab. Wie bei Drucker-Prager und Raghava ist die Fließbedingung  $F_S$  (Gleichung 3.26) abhängig von der erste Invariante  $I_1$  und bildet damit den Einfluss des hydrostatischen Spannungszustandes ab.

$$F_S = J_2' + \frac{1}{3}\sqrt{3}a_1\sigma_{Zug}I_1 + \frac{1}{3}a_2I_1^2 - \tau_{Schub}^2 = 0 \quad (3.26)$$

In der Fließbedingung sind die Parameter  $a_1$  und  $a_2$  zu finden. Dabei ist  $a_2$  ein durch die elastische Querkontraktionszahl  $\nu$  definierter Ansatzfreiwert. Der Parameter  $a_1$  beschreibt die Steigung der Fließortkurve in Abbildung 3.1. Der Parameter  $\alpha$  ergibt sich dabei aus Gleichung 3.29 und der durch Tests ermittelten Steigung  $\alpha^*$  der Fließortkurve in Abbildung 3.1. Ermittelt wird die Fließortkurve als interpolierte Gerade zwischen den Fließgrenzen für unterschiedliche Belastungsarten.

$$a_1 = \frac{3}{2} \frac{\alpha}{1 + \nu} \quad (3.27)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \frac{1 - 2\nu}{1 + \nu} \quad (3.28)$$

$$(\sigma_F^2)_{BELT} = \sigma_{Zug}^2 - \alpha^* I_1 = \sigma_{Zug}^2 - \alpha \sigma_{Zug} I_1 \quad (3.29)$$

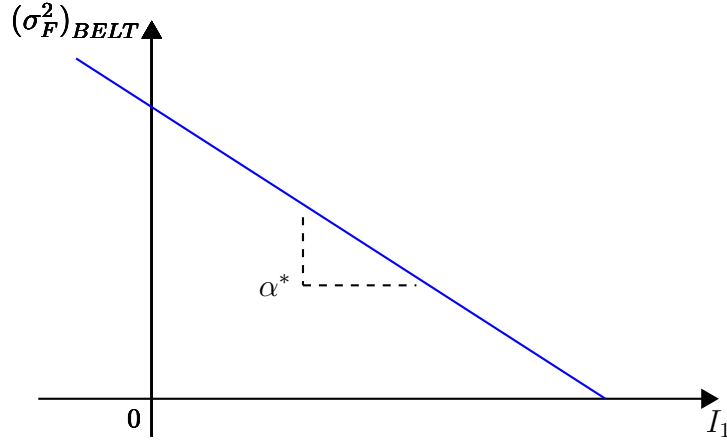


Abbildung 3.1.: Fließortkurve nach Schlimmer [30] BELTRAMI-Diagramm

#### 3.5.2. Eingangsparameter

Wie bei Drucker-Prager und Raghava werden Versuchsergebnisse unter unterschiedlicher Belastung benötigt. Im Minimalfall können die Eingangsparameter aus zwei Versuchsergebnissen (Schub und Zug) ermittelt werden. Um eine gute Absicherung des  $\alpha^*$  Wertes zu bekommen sollten jedoch mehr als zwei Fließgrenzen gegeben sein, um die Fließortkurve in Abbildung 3.1 zu interpolieren. Zudem wird die Querkontraktionszahl des Klebstoffes benötigt. Diese lässt sich jedoch aus den, ohnehin zur Bestimmung der Fließortkurve (Abbildung 3.1) notwendigen, Schub- und Zug-Versuchen ermitteln.

### 3.6. Auswahl eines geeigneten Materialmodells

Für die Auswahl eines geeigneten Materialmodells wird auf die Ergebnisse in drei Veröffentlichungen zurück gegriffen, um die Fähigkeiten der Materialmodelle zu vergleichen. In den Veröffentlichungen von Schlimmer [31], Wang [34] und dem National Physical Laboratory (NPL) in Teddington, UK [28] werden FEM-Simulation mit Testergebnissen verglichen.



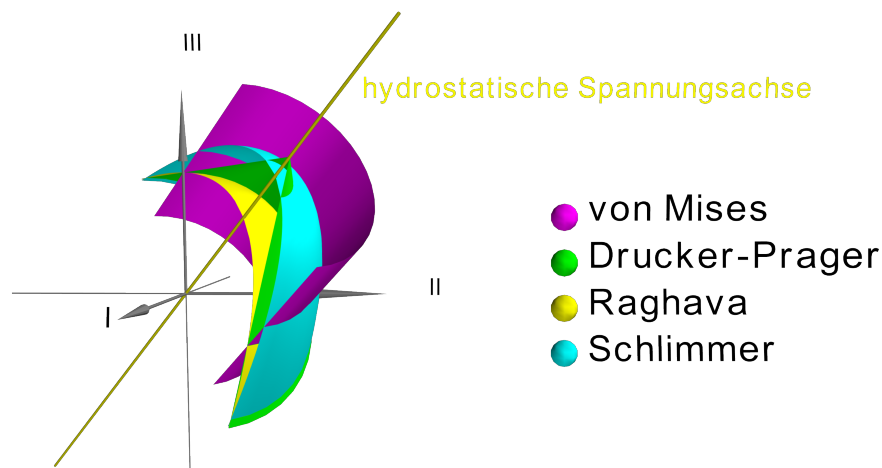


Abbildung 3.2.: Darstellung der in diesem Dokument betrachteten Fließflächen im Hauptspannungsraum (halbierte Fläche)

In Abschnitt 2.1 wird bereits beschrieben, dass das Fließverhalten von Klebstoffen eine Abhängigkeit von hydrostatischen Spannungszustand zeigt. Aus den Beschreibungen im Abschnitt zuvor ist zu erkennen, dass das von-Mises-Materialmodell somit nur in sehr begrenzten Maße für die Simulation von Klebstoffen geeignet ist. Dies lässt sich auch optisch leicht an den in Abbildung 3.2 dargestellten Fließbedingungen im Hauptspannungsraum erkennen. Nähert sich der Belastungszustand im Zugbereich dem reinen hydrostatischen Spannungszustand an, so setzt das Fließen deutlich verspätet oder gar nicht ein. Im Druckbereich hingegen setzt Fließen beim von-Mises-Modell zu einem deutlich konservativeren, früheren Zeitpunkt ein als die anderen untersuchten Modelle. Diese Betrachtung der Fließflächen deckt sich mit den Ergebnissen die vom NPL, Schlimmer und Wang veröffentlicht wurden. Als Proben, die über einen dominierenden deviatorischen Spannungsanteils (Verzerrungsanteil siehe Abschnitt 3.1) in der Klebung verfügen, werden einfache Zugproben mit Überlappungsklebung genutzt. Diese Proben lassen sich gut mit dem von-Mises-Modell nachrechnen. Bei Kopfzugproben („Butt-Joint“) hingegen, bei denen der hydrostatische Spannungszustand (Volumenänderung) dominiert, zeigen sich deutliche Abweichung zwischen Versuch und Simulation mit dem von-Mises-Modell (siehe Abschnitt 5.4).

Das Drucker-Prager und das Raghava-Modell zeigen für die in den Veröffentlichungen dargestellten Belastungsarten deutlich realistischere Ergebnisse als von Mises. Eine

generelle Aussage, welches Modelle besser geeignet ist, lässt sich aus den Ergebnissen der Veröffentlichungen jedoch nicht ableiten. Für eine Schäftprobe mit stumpfen Schäftwinkel ( $25^\circ$  - kombinierte Schub-Zug-Last), die in NPL gezeigt wird, zeigt das Drucker-Prager Modell bessere Ergebnisse als Raghava. Hingegen zeigt in der gleichen Veröffentlichung das Raghava Modell deutlich bessere Ergebnisse für Kopfzugproben.

Nach den Ergebnissen, welche Schlimmer zu seinem Materialmodelle publiziert hat, scheint dieses Modell am besten für Modellierung von Klebstoffen unter beliebiger Last geeignet. Die Nachrechnung der Versuche zeigt eine gute Übereinstimmung. Leider ist ein direkter Vergleich mit Drucker-Prager und Raghava nicht vorhanden.

An dieser Stelle sei noch ein weiteres Materialmodell genannt, welches bei Wang gute Ergebnisse bei der Klebschichtmodellierung erzielte. Das Materialmodell ist vermutlich eine Abaqus<sup>©</sup> Eigenentwicklung, da keine Quellenverweise bei Wang oder der Software Dokumentation gefunden wurden. Das Modell wird in Abaqus<sup>©</sup> „modified Drucker-Prager/Cap plasticity model“ genannt. Das Modell besitzt keine geschlossene formulierte Fließbedingung, sondern besteht aus drei Bereichen. Für jede dieser Bereiche ist eine eigene Fließbedingung definiert. Der Hauptanteil der Fließbedingung wird dabei durch Drucker-Prager definiert. Im Bereich des durch Zug definierten hydrostatischen Spannungszustanden gilt die zweite Fließbedingung. Der Übergang zwischen diesen beiden Bedingungen wird über eine dritte Bedingung definiert. Da sich in der bisherigen Projektarbeit für die FEM-Software von MSC<sup>©</sup> entschieden wurde, wird diese Modell derzeit nicht weiter in Betracht gezogen.

Bezüglich der Software Randbedingungen sind bei MSC<sup>©</sup> nur die Modelle von von Mises und Drucker-Prager implementiert. Eine Einbindung des Materialmodells von Schlimmer wird angestrebt, ist jedoch noch nicht umgesetzt. Damit stellt Drucker-Prager nach aktuellem Stand die bessere Wahl da. Wie jedoch Abschnitt 4 zeigen wird, sind die aktuell zur Verfügung stehenden Materialdaten in ihrer Qualität ungenügend. Insbesondere die ermittelten Daten unter Zugbelastung sind starken Schwankungen unterlegen. Daher wird für diese Arbeit das von-Mises-Materialmodell verwendet. Die für dieses Materialmodell notwendigen Schubdaten zeigen bei den durchgeführten Versuchen die geringste Schwankung. Mit dieser Wahl können jedoch Belastungszu-

stände mit dominierendem hydrostatischen Spannungsanteil nicht korrekt abgebildet werden. Diese Einschränkung wird bei der Auswertung berücksichtigt.

Bei der Auswahl eines geeigneten Materialmodells für die Auslegung von realen Strukturen sollte eine weitere Randbedingung berücksichtigt werden. Bevor die Auswahl der Materialmodells getroffen wird, ist zu klären, ob eine plastische Verformung der Klebschicht zulässig ist. Ist dies gegeben, muss des Weiteren geklärt werden, unter welchem Belastungszustand dies auftritt und wie groß der plastische Anteil der Deformation ist. Im einfachsten Fall ist überhaupt kein Materialmodell für die Simulation notwendig, da keine plastische Verformung zugelassen ist. Als Auslegungskriterium muss jedoch eine adäquate Vergleichsspannung definiert sein. Mögliche Vergleichsspannungen ergeben sich aus den Fließbedingungen der Materialmodelle die in den Abschnitt zuvor beschrieben wurden (ein geläufiges Beispiel für eine Vergleichsspannung ist die nach von Mises). Die Frage welche Deformation zulässig ist und was geeignete Auslegungskriterien sind, ist noch nicht geklärt.



## 4. Interpretation der Versuchsergebnisse

Im Auftrag des DLR wurde ein Probenprogramm an Torsion/Zug-Proben am Leichtbauzentrum Sachsen (LZS) in Dresden durchgeführt. Ziel dieses Probenprogramms war es Eingangsdaten für ein kontinuumsmechanisches Materialmodell zu ermitteln. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, die durch den Abschlussbericht [24] gegeben sind, zusammengefasst und bewertet. Zudem werden die für die späteren Simulationen notwendigen Materialparameter abgeleitet.

### 4.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus

In diesem Abschnitt wird der Versuchsaufbau sowie die Probengeometrie erläutert, mit der die Tests durchgeführt wurden. Die Auswahl dieses Probentyps und Dimensionen wurde durch die Veröffentlichungen von Schlimmer [31] und DIN EN 14869-1 [16] beeinflusst. Für seine Untersuchungen wurde der gleiche Probentyp für pastöse Klebstoffe angewendet. Die Fügepartner der Proben sind Rohre mit einer Länge von  $125\text{ mm}$ , einem Außendurchmesser von  $46\text{ mm}$  und einem Innendurchmesser von  $38\text{ mm}$  (Fertigungstoleranzen für diese Werte in [24] nicht gegeben). Mit einem Epoxid-Filmklebstoff EA9695 der Firma Henkel werden zwei solcher Fügepartner stirnseitig zu einer rotationssymmetrischen Rohrprobe verklebt. Gefertigt werden die zwei Fügepartnern aus Stahl, welcher gegenüber dem Klebstoff eine deutlich höhere Dehnsteifigkeit besitzt. Damit werden die Fügepartnerdehnungen klein gehalten, so dass das Klebstoffverhalten weitgehend entkoppelt vom Verhalten der Fügepartner betrachtet werden kann. In

#### 4. Interpretation der Versuchsergebnisse

Abbildung 4.1 ist ein Probenkörper sowohl als Schema als auch als Bild dargestellt. Die wichtigsten Abmaße des Proben sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Bezüglich des Verfahrens zur Fertigung der Proben sei auf den Bericht [24] verwiesen. Explizit sei hier darauf hingewiesen, dass die angenommene Klebschichtdicke von  $0,25\text{ mm}$  ein Mittelwert aus den im folgenden gezeigten Schliffbildern (Abbildung 4.2) darstellt. Wie später gezeigt wird, lässt sich aus dieser Klebschichtdicke bereits auf eine mangelhafte Klebung schließen. Bei einer Ausgangsdicke des Filmklebstoffes von  $0,2\text{ mm}$  (unausgehärtet) stellt sich bei guter Klebschichtqualität eine Dicke von  $0,1$  bis  $0,15\text{ mm}$  im ausgehärteten Zustand ein.

Abmaß	Symbol	Größe	Einheit
<i>Fügepartner</i>			
Innendurchmesser	$D_i$	38	$mm$
Außendurchmesser	$D_a$	46	$mm$
Gesamtlänge Fügepartner	$l_{gesamt}$	125	$mm$
<i>Klebschicht</i>			
Idealisierte Klebschichtdicke der Proben	$d_{Klebschicht}$	0,25	$mm$

Tabelle 4.1.: Abmaße der durch das LZS getesteten Rohrproben

Die Probe werden in einer servohydraulischen Prüfmaschine getestet, die rein einachsige bzw. kombinierte Torsions-Zug-Lasten aufbringen kann. Die Versuche wurden verschiebungsgesteuert durchgeführt. Diese sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Das dort beschriebene Lastverhältnis  $\alpha_{Last}$  bezieht sich jedoch nicht auf die Vorschubgeschwindigkeiten, die in der Tabelle gegeben sind. Es wird nach [31] über Gleichung 4.1 bestimmt und stellt einen Zusammenhang zwischen Gleitung  $\gamma_{xy}$  und Dehnung  $\varepsilon_x$  der Klebschicht dar. Die in Tabelle 4.2 sind somit die Vorschubgeschwindigkeiten bei denen sich die entsprechenden  $\alpha_{Last}$  Werte einstellen.

$$\alpha_{Last} = \frac{\gamma_{xy}}{2\varepsilon_x} \quad (4.1)$$

Ermittelt werden sollen bei diesen Versuchen ein Spannungs-Dehnungs-Verhalten

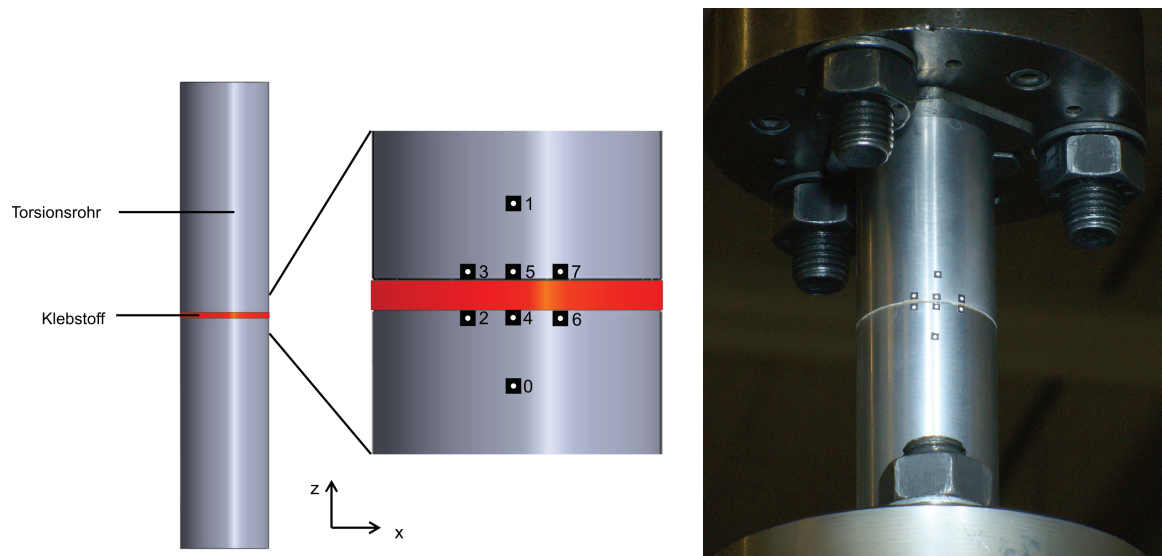


Abbildung 4.1.: Rohrprobengeometrie [24] - Schema mit Messpunktposition (links), Foto im eingebauten Zustand (rechts)

Beschreibung	Verhältnis $\alpha_{Last}$	Zugkomponenten	Schubkomponente
Zug	0	0,1 mm/min	-
Torsion	$\infty$	-	0,5°/min
Zug-Torsion	0,4	0,1 mm/min	0,1°/min
Zug-Torsion	1,4	0,1 mm/min	0,4°/min
Zug-Torsion	5	0,1 mm/min	1,2°/min

Tabelle 4.2.: Lastkombinationen des durchgeführten Probenprogramms in Maschinendaten

bzw. Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten. Dazu müssen im Versuch sowohl Kräfte/Momente als auch Deformationen gemessen werden. Aus diesen können wiederum die gewünschten Größen ermittelt werden.

Um die Dehnung bzw. Gleitung der Klebschicht zu bestimmen, sind Messpunkte aufgeklebt (siehe Abbildung 4.1). Die Verschiebungen dieser Messpunkte werden über ein optisches Messverfahren kontinuierlich ermittelt. Aus dem Verschiebungsverhältnis der Messpunkte zueinander kann die Dehnung bzw. Gleitung der Klebschicht berechnet werden. Weitere Informationen zur Berechnung sind in Abschnitt 4.2.3 gegeben.

Die Kräfte/Momente die im Versuch auftreten, werden mittels entsprechenden Kraftmessdosen an der Prüfmaschine aufgezeichnet. Die Rechenschritte zur Bestimmung der

Spannungen sind ebenfalls in Abschnitt 4.2.3 gegeben.

## 4.2. Bewertung der Ergebnisse

Im Bericht des LZS [24] wurden die Ergebnisse der Versuche dargestellt, aber nicht bewertet. Zum Inhalt der Arbeiten des LZS gehört auch die Auswertung der Versuchsrohdaten mittels Regressionsverfahren. Die im Bericht dargestellten Ergebnisse werden in diesem Abschnitt interpretiert und bewertet. Dazu gehört die Betrachtung von Fertigungsabweichungen und deren Einfluss, die Beurteilung der Messfehler sowie die Gesamtbetrachtung von Abweichungen und Fehlern.

### 4.2.1. Einfluss von Fertigungsabweichungen

In diesem Abschnitt werden die fertigungsbedingten Effekte betrachtet, die einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse vermuten lassen. Diese Betrachtung dient als Grundlage zur Bewertung der Ergebnisqualität. Dabei stützt sich diese Untersuchung auf Schliffbilder von ungetesteten Proben. Eine zerstörungsfreie Prüfung der Proben vor dem Test wurde nicht durchgeführt. Die Proben für die Schliffbilder wurden jedoch mit dem gleichen Vorgehen wie die Versuchproben gefertigt, so dass die Schliffbilder in Abbildung 4.2 für das Fertigungsverfahren repräsentativ sind. Betrachtet man nun die Schliffbilder in Abbildung 4.2, so lassen sich drei fertigungsbedingte Einflussgrößen erkennen. Diese sind die variierende Breite der Klebschicht, die Anzahl und Größe von Poren und die variierende Klebdicke der Klebschicht.

#### *Variierende Breite der Klebschicht*

In Abbildung 4.2 sind Schliffbilder einer Ebene senkrecht zum Probenumfang dargestellt. Darauf ist zu erkennen, wie unspezifisch die Klebschicht aber auch die Fügepartner an den Ausläufen gestaltet sind und wie stark dadurch die effektive Klebschichtbreite variiert. Diese Variation der Klebschichtbreite wird bei der Auswertung der Versuchsergebnisse nicht berücksichtigt, es wird für die Spannungsberechnung immer die ideale Klebschichtbreite angenommen. Um den Einfluss der Breitenvariation



auf die Versuchsergebnisse abzuschätzen, wird im Folgenden der zu erwartende Fehler für reinen Schub und Zug berechnet. Dabei wird von einer konstanten Spannungsverteilung in der Klebschicht ausgegangen. Der Einfluss der Kantenform der Fügepartner (Größe und Form der Fase) wird hier nicht betrachtet. Diese Problemstellung wird in Abschnitt 7 detailliert thematisiert.

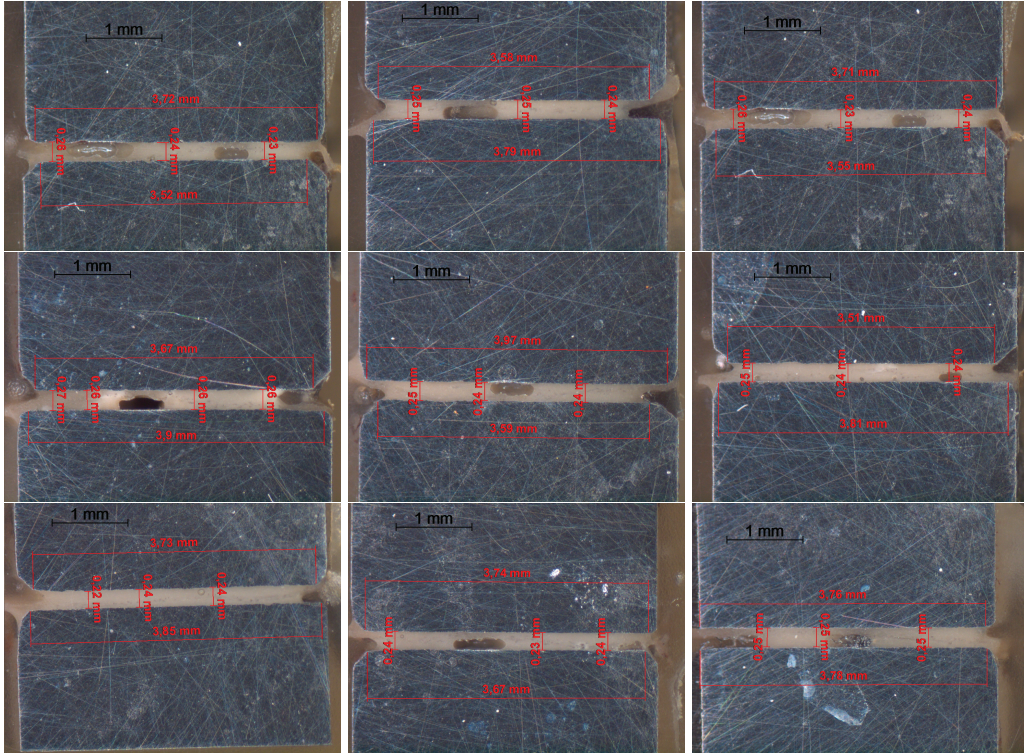


Abbildung 4.2.: Schliiffbilder der Klebschichten von nicht getesteten Rohrproben [24]

Der zu erwartende Fehler bei reiner Zugbelastung ergibt sich aus der Variation der ringförmigen Querschnittsfläche des Klebstoffes  $A$  in Gleichung 4.2. Diese Gleichung beschreibt die Spannungsberechnung aus den gemessenen Kräften  $F_{Zug}$ . Die Querschnittsfläche wird durch den inneren und äußeren Durchmesser ( $D_a$ ,  $D_i$ ) definiert (Gleichung 4.3). Für die Berechnung der in Abbildung 4.3 gezeigten Kurve wurde bei konstanter Kraft der innere Durchmesser um  $\Delta x_{Radius}$  vergrößert und der äußere Durchmesser im gleichen Maße verkleinert. Mit diesen geänderten Durchmessern wird eine Spannung nach Gleichung 4.3 und 4.2 ermittelt. Auf der y-Achse in Abbildung 4.3 wird dann die prozentuale Abweichung ( $\Delta\sigma_{Klebschichtdicke}$ ) dieser Spannung

zur Spannung bei idealer Klebschichtbreite (Variation gleich  $0\text{ mm}$ ) aufgetragen.

$$\sigma_{Zug} = \frac{F_{Zug}}{A} \quad (4.2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_a^2 - D_i^2) \quad (4.3)$$

Für die Bestimmung des zu erwartenden Fehlers bei der Schubspannungsberechnung  $\tau$  wird die gleiche Variation der Durchmesser angewendet wie bei der Zugbetrachtung. Dabei ist Gleichung 4.4  $M_t$  das gemessene Drehmoment und  $W_t$  das Torsionswiderstandsmoment. Für dickwandige Rohre und die Schubspannungsberechnung am äußeren Rand ist  $W_t$  nach Gleichung 4.4 definiert [19]. Auch die Abweichung der Schubspannung zwischen idealer Klebschichtbreite und reduzierter sind in Abbildung 4.3 aufgetragen.

$$\tau = \frac{M_t}{W_t} \quad (4.4)$$

$$W_t = \frac{\pi D_a^3}{16} \left( 1 - \left( \frac{D_i}{D_a} \right)^4 \right) \quad (4.5)$$

Betrachtet man die Schliffbilder in Abbildung 4.2, so ist ein Wert der Breitenreduktion von  $0,5\text{ mm}$  (bezogen auf den Durchmesser) realistisch. Für diesen Wert ergibt sich sowohl für Schub- als auch Zugbelastung bereits eine Abweichung von etwa 12-13 %.

Bei der zuvor beschriebenen Betrachtung wird von den idealen Nennmaßen von Innen- und Außendurchmesser ausgegangen. Diese Maße unterliegen jedoch auch Schwankungen, die durch Toleranzen definiert werden. Im Bericht des LZS [24] wurden keine expliziten Toleranzen für Durchmesser gegeben. Geht man daher von Allgemeintoleranzen „m“ (DIN ISO 2768) aus, so sind die Maße mit  $\pm 0,3\text{ mm}$  toleriert. Was einem zusätzlichen maximalen absoluten Fehler von etwa 7 % entspricht.

#### *Anzahl und Größe von Poren*

In Abbildung 4.2 sind deutliche Poren zu erkennen, deren Breite zum Teil mehr als dem Doppelten der Klebschichtdicke entspricht und die fast über die gesamte Klebschichtdicke reichen. Vermutete Ursachen dieser Poren ist ein unzureichender Druck

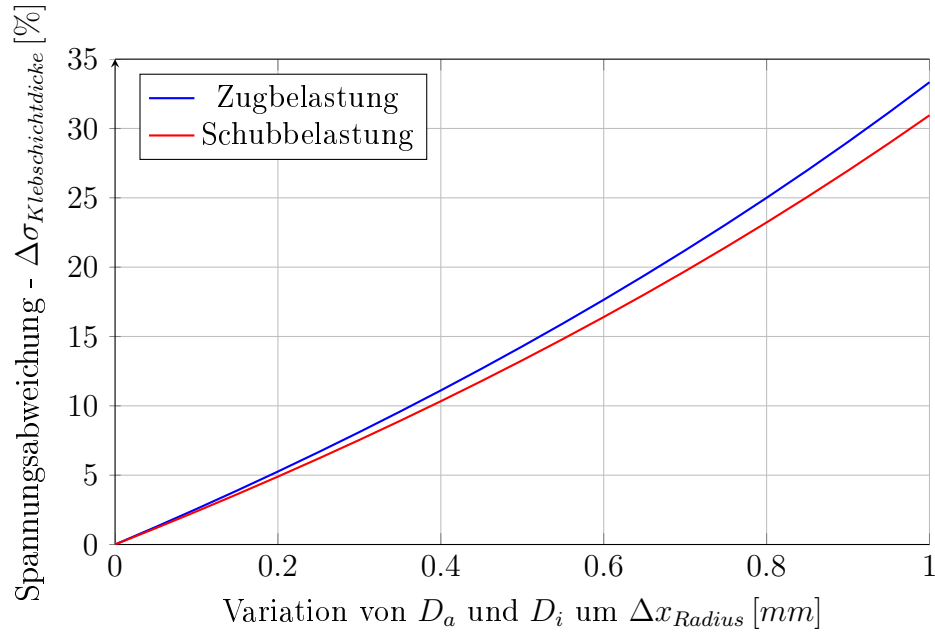


Abbildung 4.3.: Abweichung ( $\Delta\sigma_{Klebschichtdicke}$ ) der aus Versuchsdaten ermittelten Spannungen durch Variation der realen Klebschichtbreite  $\Delta x_{Radius}$

bei der Fügung der Proben. Betrachtet man die Poren als Reduktion der Probenbreite, so kann der Ansatz verfolgt werden, welcher hinter Abbildung 4.3 steht. Die Größe der in Abbildung 4.2 zu erkennenden Poren lassen auf einen deutlichen Einfluss schließen. Eine genaue Aussage ist jedoch nicht möglich, da keine Information entlang der gesamten Klebschicht vorhanden sind. Die Bruchbilder, die im Bericht [24] dokumentiert sind, lassen allerdings vermuten, dass die Schnittbilder repräsentativ sind für einen Großteil der Klebschicht. Neben der Reduktion der Fügefläche treten an den Ränder der Poren zudem Spannungsspitzen auf, deren Einfluss in Abschnitt 6 näher betrachtet wird.

### *Variierende Klebschichtdicke*

Eine Variation der Klebschicht kann auf zwei Arten geschehen, konstant über die gesamte Klebschicht oder variierend entlang des Umfangs. Eine konstante Klebschichtdickenvariation kann durch Fertigungseffekte entstehen, z. B. durch zu geringen Druck beim Fügen. Ein solcher Effekt wird bei den hier untersuchten Proben vermutet, da die nominelle Dicke des verwendeten Filmklebstoffs nach dem Aushärten mit 0,1 bis

0,15 mm angegeben ist (etwa 0,25 mm in Proben, siehe Abbildung 4.2). Variiert die Klebschichtdicke entlang des Umfangs, ist dies durch das Verkippen der beiden Fügepartner zueinander zu erklären. Die beiden Effekte können sich zudem auch überlagern.

Bei der Auswertung der Messergebnisse muss darauf geachtet werden, dass mit der jeweiligen Klebschichtdicke der Probe gerechnet wird und nicht mit einem Mittelwert. In den Gleichungen, die zur Berechnung von Dehnung und Gleitung in [24] verwendet werden (Gleichungen 4.6 und 4.7), geht die Klebschichtdicke linear ein und somit auch eine möglicher Fehler durch die Abweichung. Für die Abschätzung des Fehlers, der auf Grund der Abweichung auftreten kann, wird auf Werte aus [24] zurückgegriffen. Für die Berechnung der Dehnung und Gleitung (Gleichung 4.6 und 4.7) wurde dort für die Klebschichtdicke ein Wert von 0,25 mm angenommen. Dies entspricht einem Mittel aus den in Abbildung 4.2 ermittelten Dicken. Die Schwankungen um diesen Mittelwert betragen in etwa  $\pm 0,02$  mm. Das entspricht auf Grund des beschriebenen linearen Einflusses einem Fehler von  $\pm 8$  % bei der Berechnung von Dehnung und Gleitung. Der Einfluss der Klebschichtdickenvariation durch Verkippen der Fügepartner ist weniger leicht zu bewerten. Bei einer Probe, bei der die Fügepartner zueinander verkippt sind, wird schon beim Einspannen der Probe eine Last eingebracht. Diese entsteht dadurch, dass die Fügepartner beim Einspannen in eine zueinander fluchtende Position gezwungen werden. Welchen Einfluss diese hat, wird in Abschnitt 6 mit FEM-Simulationen untersucht.

#### 4.2.2. Einfluss des Messverfahrens

In diesem Abschnitt werden die Fehler in der Messkette der Versuche betrachtet. Als Messwerte aufgezeichnet werden die Kräfte/Momente so wie die Verschiebung der Fügepartner zueinander. Für die Kraft/Momenten Messung ist in der Prüfmaschine eine Kraftmessdose mit einer relativen Messungenauigkeit von 0,51 %/0,26 % (Kraft/Moment) für den relevanten Lastbereich von 20 kN/525 Nm verwendet wurde. Nach DIN EN 15870 [13] für Kopfzugversuche und DIN EN 14869-1 [16] Torsionsrohrproben ist eine Messgenauigkeit von unter einem Prozent ausreichend. Zur Bestimmung der Dehnung bzw. Gleitung wird das optische Messsystem PONTOS der Firma

GOM eingesetzt. Diese kann mit einer maximalen Messgenauigkeit von  $\pm 0,001\text{ mm}$  die Position eines Messpunktes (siehe Abbildung 4.1) in einem festen Referenzkoordinatensystem bestimmen. Aus den gemessenen Positionen der Messpunkte im Bezug zur Ausgangsposition werden damit die Dehnungen bzw. Gleitungen bestimmt (siehe Gleichung 4.6 und 4.7).

Bei der Bestimmung von Dehnung und Gleitung zeigt sich eine Problematik mit dem verwendeten Messsystem. Die maximale Genauigkeit des Systems liegt, wie beschrieben, bei  $\pm 0,001\text{ mm}$ . Diese wird jedoch vermutlich nicht erreicht, da eine Kamera mit kleiner Auflösung verwendet wurde (5M statt 12M Kamera). Dies ist allerdings unerheblich, da bereits die maximale Genauigkeit für die zu messenden Größen nicht ausreichend. In den Test hat sich für den Zugversuch, als kritischster Lastzustand, lediglich eine Dehnung von etwa  $0,0025\text{ mm}$  (Zugprobe: etwa 1 % max. Dehnung und  $0,25\text{ mm}$  Klebschichtdicke) eingestellt. Im schlechtesten Fall (Messfehler: Messpunkt-1 =  $+0,001\text{ mm}$  und Messpunkt-2 =  $-0,001\text{ mm}$ ) könnte diese maximale Dehnung bei maximaler Messgenauigkeit kaum gemessen werden. Die Messfehler, die sich aus dieser Betrachtung ergeben, sind deutlich an Hand der grauen Messpunkt Wolke in Abbildung 4.5 und 4.6 in Abschnitt 4.3 zu erkennen.

### 4.2.3. Auswertung der Messdaten

Ziel dieses Abschnittes ist es, einen Einblick in die gemessenen Größen zu geben und darzustellen, wie diese ausgewertet werden. Zudem soll dargelegt werden, wodurch die Qualität der im Abschnitt 4.3 dargestellten Versuchsergebnisse beeinflusst wird. Fasst man die Auswertung der Versuche zusammen, so werden aus kontinuierlich gemessenen Verschiebungen von einzelnen Messpunkten und der aufgebrachten Last, Spannungs-Dehnungskurven bzw. Schubspannungs-Gleitungskurven ermittelt. Dazu sind drei Arbeitsschritte notwendig.

#### *Plausibilisierung*

Der erste Schritt bei der Auswertung ist die Plausibilisierung der Messdaten. Darun-

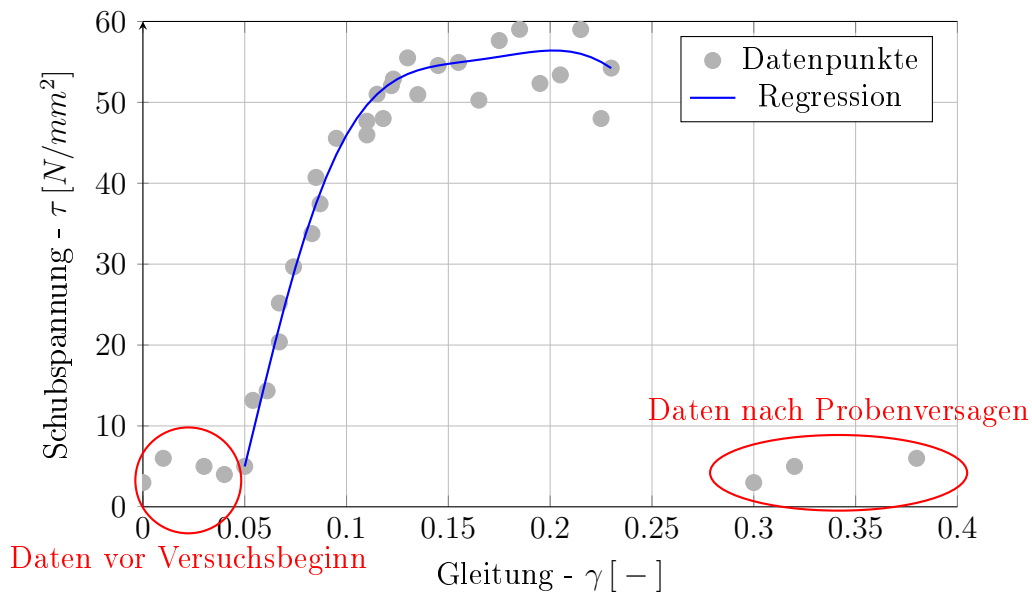


Abbildung 4.4.: Generisches Beispiel für Regression und Plausibilisierung an Hand einer Schubspannungs-Gleitungskurve (ohne Nullpunktverschiebung)

ter ist zu verstehen, dass Datenpunkte aus den Messdaten entfernt werden, die deutlich nicht das Probenverhalten widerspiegeln. Für die hier betrachteten Messdaten sind dies insbesondere Datenpunkte, die vor Versuchsbeginn ohne Last aufgezeichnet wurden oder nach Versagen der Probe (siehe Abbildung 4.4). Auch zu diesem Arbeitsschritt zu zählen ist die Nullpunktverschiebung der Messdaten. Dies ist notwendig, da die Messergebnisse ggf. bereits im unbelasteten Zustand Verformungen aufweisen (z.B. durch das Setzen der Proben in der Einspannung).

### *Regression*

Auf Basis von aufgezeichneten Messdaten kann mittels Regression, hier lineare Regression, eine Funktion ermittelt werden, die den Zusammenhang zwischen den gemessenen Größen darstellt (siehe Abbildung 4.4). Dabei wird als Ausgangspunkt eine Funktion gewählt, von der angenommen wird, dass sie die physikalischen Zusammenhänge der Messgrößen grundsätzlich beschreiben kann. Wie auch bei diesen Messdaten wird als Funktion häufig ein Polynom n-ten Grades verwendet, wie z. B.  $y = a + bx + cx^2$ . An dieser Funktion wird eine Optimierung der Variablen  $a, b$  und  $c$  durchgeführt. Das Op-

timierungsziel ist dabei die Minimierung des Residuums<sup>1</sup>. Dieses wird hier wie üblich über das Quadrat der Abweichung zwischen Funktionswert und Messpunkt definiert (Gaußsche Methode der kleinsten Quadrate).

### *Berechnung von Dehnung und Gleitung*

In Abbildung 4.1 sind die Probenkörper mit den aufgeklebten Messpunkten dargestellt. Die Position dieser Messpunkte wird für jede Messung bestimmt. Die gemessene Position bezieht sich dabei auf ein für das Messfeld konstantes Koordinatensystem. Aus den Positionen zweier Messpunkte des Messzeitpunktes „ $t$ “ und der entsprechenden Position bei Messzeitpunkt „ $0$ “ lassen sich Dehnung und Gleitung berechnen. Für die Berechnung der Werte werden zwei Annahmen getroffen:

- Vernachlässigbar kleine Verformung der Stahlkörper
- Allgemein kleine Verformungen

Unter diesen Annahmen ergeben sich die beiden Gleichungen für Dehnung und Gleitung [24]:

$$\varepsilon_{ijt} = \frac{(z_i - z_j)_t - (z_i - z_j)_0}{d_{Klebschicht}} \quad (4.6)$$

$$\gamma_{ijt} = \frac{(x_i - x_j)_t - (x_i - x_j)_0}{d_{Klebschicht}} \quad (4.7)$$

Unter den getroffenen Annahmen werden Abweichungen durch das händische Aufbringen der Messpunkte herausgerechnet. Bei den Gleichungen sind die Orientierung der Verschiebungen  $x$  und  $z$  entsprechend dem Koordinatensystem in Abbildung 4.1 definiert. Die Indizes  $i$  und  $j$  stehen für Messdaten auf dem oberen oder dem unteren Fügekörper. Der Index  $t$  steht für einen Messzeitpunkt und der Parameter  $d_{Klebschicht}$  beschreibt die idealisierte Klebschichtdicke. Bei der Berechnung muss besonders die Bestimmung der Positionsdifferenz zum Zeitpunkt „ $0$ “ möglichst genau sein, da dieser die Ergebnisse aller folgenden Zeitschritte beeinflusst.

Für die Gleichungen 4.6 und 4.7 lässt sich ein maximaler Gesamtfehler für die Bestimmung von Gleitung bzw. Dehnung leicht bestimmen. Der Gesamtfehler ergibt sich

---

<sup>1</sup>Abweichung der exakten Lösung zur Näherungslösung

als Summe der Fehler der Einzelmessungen. Da vier Messwerte mit derselben Messgenauigkeit in die Gleichungen einfließen, entspricht der Gesamtfehler dem vierfachen der Genauigkeit des Messsystems.

Mit den drei beschriebenen Arbeitsschritten wird nun die Datenauswertung durchgeführt, wobei am Anfang immer die Plausibilisierung der Daten steht. Die Arbeitsschritte Regression und Dehnungs- bzw. Gleitungsermittlung können jedoch variiert werden. Eine Möglichkeit ist es die Dehnungen oder Gleitungen zuerst für jeden Messzeitpunkt zu bestimmen und dann die Regressionskurve zu ermitteln. Die zweite Möglichkeit ist zuerst die Regressionskurve für die Messdaten der Fügepartnern zu ermitteln und danach aus den beiden gegebenen Regressionskurven die Dehnungen bzw. Gleitungen zu bestimmen. Diese beiden Möglichkeiten lassen sich zudem noch erweitern um die Kombination von Messpunkten. Dabei können jeweils einzelne Messpunkt auf beiden Fügepartnern betrachtet werden oder die Messpunkte der jeweiligen Fügepartner zusammengefasst werden. Final kommt bei der Ermittlung der Spannungs-Dehnungs oder Schubspannungs-Gleitungskurven auch noch die Statistik zum tragen. Es wurden im Probenprogramm sechs bis sieben Probe pro Belastungszustand getestet. Aus den Ergebnissen der einzelnen Proben muss somit noch eine Auswertung über alle Proben erfolgen. Bei dieser Auswertung muss eine finale Nullpunktverschiebung der bestimmten Spannungs-Dehnungs- bzw. Gleitungsfunktion vorgenommen werden. Diese fällt größer oder kleiner aus, je nach dem wie gut die Nullpunktverschiebung bereits bei der Plausibilisierung gelungen ist.

Der Unterschied zwischen den beschriebenen Methoden wurde in [24] nicht untersucht. Bei den großen Schwankungen, die in den Messdaten gegeben sind, ist fraglich, ob eine solche Untersuchung quantifizierbare Ergebnisse liefern würde. Für folgende Versuchsreihen sollte die Form der Auswertung jedoch näher betrachtet werden. Derzeit werden die Versuche nach dem folgenden Schema ausgewertet.

1. Plausibilisierung
2. Für jeden Messzeitpunkt Mitteln der Messdaten für jeden Fügepartner (für die drei Messpunkte an der Klebschicht)



3. Berechnen von Gleitung bzw. Dehnung
4. Regressionskurven bestimmen
  - a) Einzeln für jeden Versuch
  - b) Punktwolken der jeweiligen  $\alpha_{Last}$  Versuche zusammenfassen und über die gesamte Punktwolke eine Regression durchführen

## 4.3. Ableiten von Parametern für das gewählte Materialmodell

In diesem Abschnitt werden die gegebenen Versuchsergebnissen dargestellt und die Materialdaten abgeleitet, die als Eingangsgrößen für das gewählte Materialmodell notwendig sind. In den folgenden Diagrammen sind die Regressionskurven für reine Zug- und Torsionsbelastung dargestellt. Diese beiden Versuchsergebnisse sind für das von-Mises-Materialmodell als Eingangsgrößen relevant. Für die Ergebnisse der weiteren Lastkombinationen (Tabelle 4.2) sei auf den Bericht [24] verwiesen.

### *Zug*

Abbildung 4.5 zeigt die Versuchsergebnisse für alle sechs Tests unter reinem Zug. Diese sind als graue Punktwolke zu erkennen. Aus dieser gesamten Punktwolke wurde die schwarze Regressionskurve (Gesamt) ermittelt, die somit auch eine statistische Betrachtung über ein ganzes Probenprogramm beinhaltet. Der blaue und rote Kurvenverlauf wurde hingegen durch Regression von Versuchsdaten jeweils eine Probe ermittelt. Die blaue und rote Kurve stellen dabei die „Minimum“ und „Maximum“ Kurve da (Min, Max). Die Ergebnisse dieser Proben grenzen den Bereich der ermittelten Regressionskurvenverläufe nach oben und unten ein. Kurven mit negativer Anfangssteigung bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt, da diese Daten unrealistisch sind und zudem nicht als Simulationseingangsgrößen geeignet sind. Die Auswahl der Min und Max Kurve ist in Abbildung 4.5 im Vergleich mit den grau gestrichelten Kurven zu erkennen. Diese Kurven sind Regressionskurven für weitere einzelne Proben. Die blauen

und roten vertikalen Linien definieren den Bereich der in den Einzelversuchen auftretenden Versagensdehnungen. Die blauen und roten Regressionskurven stehen dabei nicht zwangsläufig mit den blauen und roten vertikalen Linien in einen Zusammenhang, wie es hier der Fall ist.

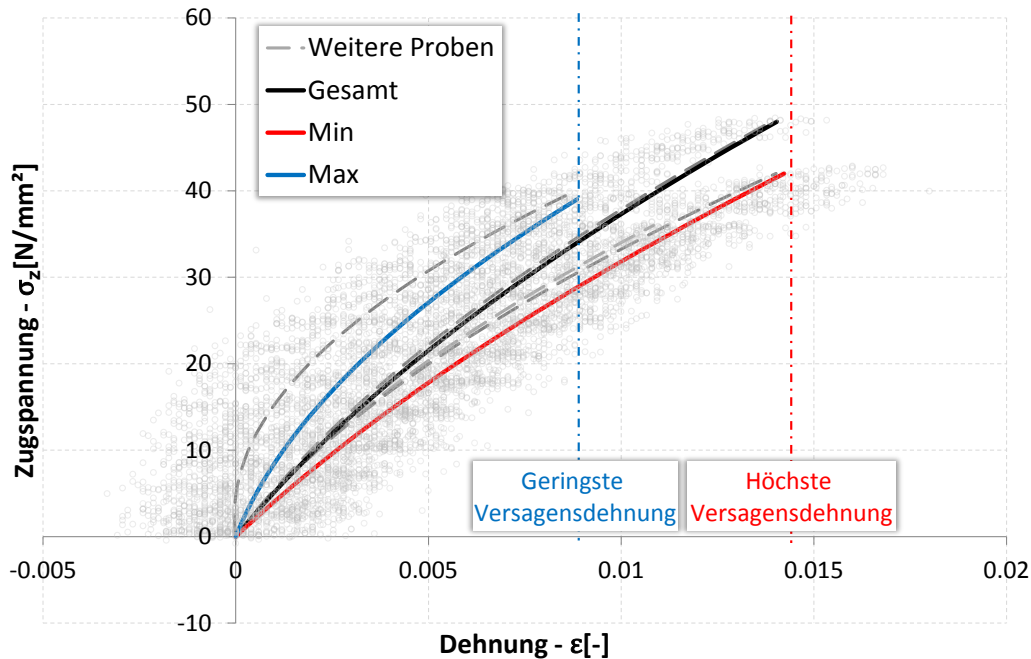


Abbildung 4.5.: Zugspannungs-Dehnungskurve bei Zugbelastung - Regressionskurve über Probenprogramm (Gesamt) sowie für Einzelproben zudem einzelne Messpunkte als Punktwolke

#### *Torsion*

Für die Versuchsergebnisse unter reiner Torsionslast gelten die gleichen Definitionen für die blaue, rote und schwarze Kurve (hier sieben Proben). Auch die vertikalen Linien haben in Abbildung 4.6 die selbe Bedeutung.

Für die FEM-Simulation mit einem von Mises Plastizitätsmodell müssen bei der FEM-Software Nastran von MSC® die Spannungs-Dehnungskurve des Materials in tabellarischer Form gegeben werden. Dies geschieht über diskrete Punkte, die leicht über die Gleichung der Regressionskurve ermitteln werden können. Bei Daten aus einem Versuch dessen Ergebnis ein Schubspannungs-Gleitungskurve ist, müssen die Umrechnungsregeln beachtet werden die in Abschnitt 3.2.2 beschrieben sind. Die Regressions-

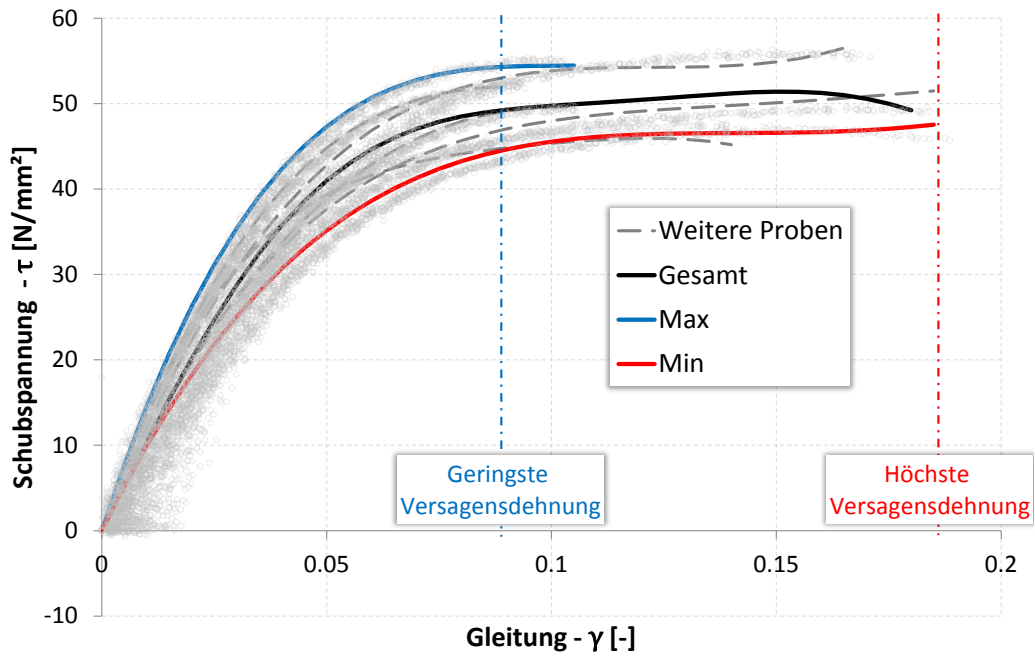


Abbildung 4.6.: Schubspannungs-Gleitungskurve bei Torsionsbelastung - Regressionskurve über Probenprogramm (Gesamt) sowie für Einzelproben zudem einzelne Messpunkte als Punktwolke

funktionen für Spannung-Dehnung (reine Zugbelastung) und Schubspannung-Gleitung (reine Torsionsbelastung) wurden vom LZS wie folgt bestimmt:

Spannung-Dehnung:

$$\varepsilon_{Gesamt} = 2,28 \cdot 10^{-6} \sigma^2 + 1,83 \cdot 10^{-4} \sigma \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{Min} = 3,78 \cdot 10^{-6} \sigma^2 + 1,75 \cdot 10^{-4} \sigma \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_{Max} = 3,56 \cdot 10^{-6} \sigma^2 + 8,82 \cdot 10^{-5} \sigma \quad (4.10)$$

Schubspannung-Gleitung:

$$\begin{aligned} \tau_{Gesamt} = & 1,691 \cdot 10^7 \gamma^6 - 1,1253 \cdot 10^7 \gamma^5 + 2,7028 \cdot 10^6 \gamma^4 \\ & - 2,6437 \cdot 10^5 \gamma^3 + 3,7421 \cdot 10^3 \gamma^2 + 1,0205 \cdot 10^3 \gamma \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \tau_{Min} = & -4,9072 \cdot 10^{-2} \gamma^6 + 2,6367 \cdot 10^{-2} \gamma^5 - 3,2800 \cdot 10^4 \gamma^4 \\ & + 3,0337 \cdot 10^4 \gamma^3 - 8,9254 \cdot 10^3 \gamma^2 + 1,0775 \cdot 10^3 \gamma \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned}\tau_{Max} = & 6,4063 \cdot 10^{-1}\gamma^6 - 1,9922 \cdot 10^{-1}\gamma^5 + 2,3926 \cdot 10^{-2}\gamma^4 \\ & + 5,25 \cdot 10^4\gamma^3 - 1,5913 \cdot 10^4\gamma^2 + 1,6108 \cdot 10^3\gamma\end{aligned}\quad (4.13)$$

Dabei beziehen sich die Indizes *Gesamt*, *Min* und *Max* auf die entsprechenden Kurven in Abbildung 4.5 und 4.6.

## 4.4. Zusammenfassung

In den vorherigen Abschnitten wurden unterschiedliche Fehlerquellen aufgezeigt und bewertet. Zusammengefasst führt der große Unterschied zwischen Soll- und Ist- Geometrie und die damit verbundene schlechte Klebschichtgüte zur großen Streuung der Ergebnisse. Zudem führen die geringen Messgenauigkeit bei der Verformungsmessung zu deutlichem Messrauschen. Daher sind die bisherigen Versuchsergebnisse für einen Vergleich unterschiedlicher Materialmodelle ungeeignet und die Ergebnisse solcher Vergleiche können lediglich als Tendenz betrachtet werden. Auf Grund der Ergebnisstreuungen werden bei den folgenden Untersuchungen nicht nur mit den gemittelten Regressionskurven aller entsprechenden Versuche gerechnet, sondern auch explizite Proben mit ihrer entsprechenden Spannung-Dehnungskurve simuliert. Die für das von-Mises-Materialmodell notwendigen Eingangsgrößen lassen sich dabei leicht aus den entsprechenden Regressionskurven ermitteln.

In den folgenden beiden Tabellen 4.3 und 4.4 werden die Kenngrößen zusammengefasst die die Genauigkeit der Messung beeinflussen.

Parameter	Sollwert	Absoluter Fehler
Verschiebung	$x$	$\pm 0,001\text{ mm}$
Kraft	$x$	$\pm 0,102\text{ kN}$
Moment	$x$	$\pm 1,365\text{ Nm}$

Tabelle 4.3.: Beim Test der Rohrproben auftretenden systematische Messfehler

Nicht betrachtet werden konnten zufällige Fehler wie Vibrationen, Luftbewegungen und Temperaturschwankungen, da hierzu keine Informationen vorliegen.

Bisher unberücksichtigt ist zudem die Genauigkeit mit der die Lastkombinationen  $\alpha$

---

Parameter	Sollwert	Abweichung	Absoluter Fehler
Klebschichtbreite	4 mm	-0,5 mm	
Spannungen			12-13 %
Klebschichtdicke	0,25 mm	$\pm 0,02$ mm	
Verzerrungen			8 %

---

Tabelle 4.4.: Einfluss von Fertigungsabweichungen auf die Versuchsergebnisse bei Rohrproben tests

aufgebracht werden. Die Prüfmaschine hat eine begrenzte Regelgenauigkeit (nicht genau bekannt), mit der die Torsions- und Zuglasten aufgebracht wird. Diese Fehlerquelle beeinflusst somit nicht die Genauigkeit der Messung an sich, sondern die Genauigkeit mit der das Verhältnis  $\alpha$  zwischen Dehnung und Gleitung aufgebracht wird. Wie genau das Spannungs-Dehnungs-Verhalten durch diese Fehlerquelle beeinflusst wird ist auf Grund des nichtlinearen Materialverhalten schwer abzuschätzen. Die Tendenzen werden jedoch durch die Unterschiede zwischen den Versuchsergebnissen der drei getesteten  $\alpha$ -Werte sichtbar (siehe Anhang A).



## 5. Aufbau und Validierung des FE-Modells

Ziel dieses Abschnittes ist es das Verhalten der Rohrproben im Versuch analytisch abzubilden und einzelne Detaillierungsstufen der FEM-Simulation zu validieren.

### 5.1. Analytische Rechnung

In diesem Abschnitt wird mittels einfacher analytischer Ansätze der technischen Mechanik (Elastostatik) [19] das Verhalten der im Versuch getesteten Rohrproben unter reiner Zug- und Torsionslast bestimmt. Zudem werden die Lastkombinationen definiert, die bei den folgenden Simulationen als Verschiebungen aufgebracht werden.

#### 5.1.1. Zugbelastung

Bei der analytischen Betrachtung der Proben unter reinem Zug werden die drei Bereiche (Fügekörper  $\Rightarrow$  Klebschicht  $\Rightarrow$  Fügekörper) als Reihenschaltung von sich elastisch dehrenden Körpern unterschiedlicher Steifigkeit idealisiert. Die analytische Rechnung wird mit einer linearen FEM Simulation des Probenkörpers verglichen. Bei diesem Vergleich werden die in Tabelle 5.1 gegebenen Geometrie- und Materialdaten verwendet. Die Materialdaten des Klebstoffs sind dabei aus den Regressionskurven der Schubversuche (Gesamt-Regressionskurve - Abbildung 4.6) abgeleitet. Das verwendete FE-Modell entspricht dem in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Gesamtmodell-v1.

Der hier gezeigte Vergleich einer einfachen analytischen Rechnung mit einer linearen Simulation ist der erste Schritt bei der Validierung eines FE-Modells. Anhand des Ver-

Parameter	Symbol	Größe	Einheit
<i>Geometrie</i>			
Innendurchmesser	$D_i$	38	mm
Außendurchmesser	$D_a$	46	mm
freie Länge Fügepartner	$l_{frei}$	75	mm
Klebschichtdicke	$d_{Klebschicht}$	0,25	mm
<i>Materialdaten</i>			
<u>Klebstoff:</u>			
E-Modul	$E_K$	3100	N/mm <sup>2</sup>
	$E_{KQ}$	47866,22	N/mm <sup>2</sup>
Schubmodul	$G_K$	1040	N/mm <sup>2</sup>
Querkontraktionszahl	$\nu_K$	0,49	-
<u>Fügepartner - Stahl:</u>			
E-Modul	$E_S$	210000	N/mm <sup>2</sup>
Schubmodul	$G_S$	80769	N/mm <sup>2</sup>
Querkontraktionszahl	$\nu_S$	0,3	-

Tabelle 5.1.: Ausgangsdaten für analytische Betrachtung - Geometrie und Materialdaten

gleiches kann die Plausibilität des Modells geprüft werden. Für diese Prüfung ist die Gesamtdehnung der Probe unter Last  $F_{Zug}$  wenig aussagekräftig, da der lokale Einfluss der Klebschicht nur verschmiert über die Gesamtlänge der Probe betrachtet wird. Besser geeignet ist eine dezidierte Betrachtung der Probenlängung an diskreten Punkten entlang der Probenlängsachse. Für die analytische Betrachtung kann die Längung der drei Komponenten der Probe (Fügekörper  $\Rightarrow$  Klebschicht  $\Rightarrow$  Fügekörper) getrennt voneinander berechnet und dann addiert werden. Dabei wird die Längung  $\Delta l$  über das Hookesche Gesetz berechnet. Die allgemeine Form ist in Gleichung 5.1 gegeben ( $l_0$  - Ausgangslänge,  $A$  - Querschnittsfläche).

$$\Delta l = \frac{F_{Zug} l_0}{EA} \quad (5.1)$$

Trägt man die Längung über der Probenlänge auf, so erhält man die Kurven in Abbildung 5.1 und 5.2. In Abbildung 5.2 beschränkt sich das Betrachtungsfenster auf den Bereich um die Klebschicht. In den beiden Abbildungen werden drei Kurven dargestellt



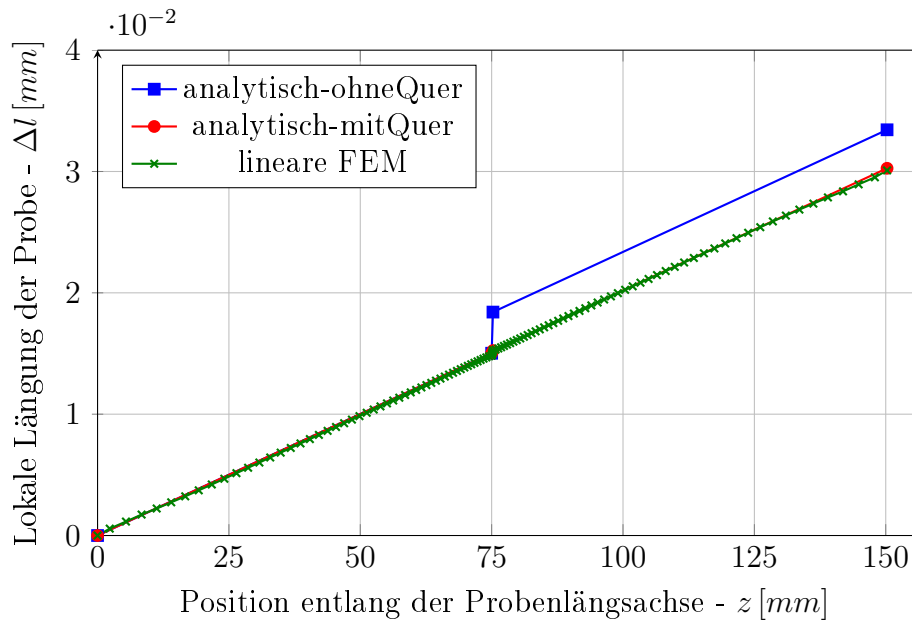


Abbildung 5.1.: Probenverformung unter Zug - Vergleich FEM zu analytisch (Gesamte freie Länge)

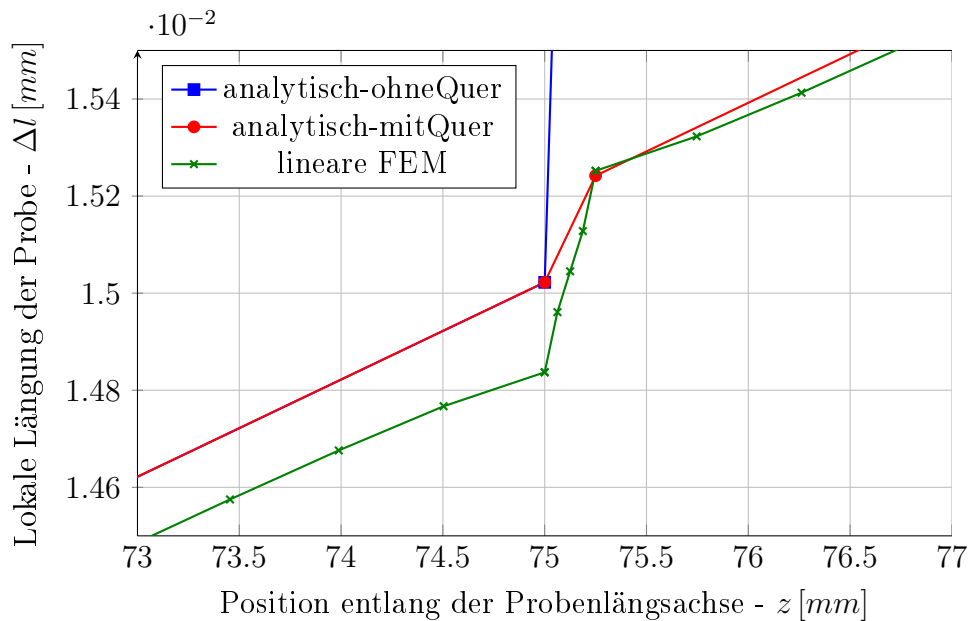


Abbildung 5.2.: Probenverformung unter Zug - Vergleich FEM zu analytisch (Klebschichtumgebung)

( $F_{Zug} = 22,2kN$ ). Zwei dieser Kurven stellen analytische Berechnungen dar, die sich bezüglich des E-Moduls ( $E_K$  und  $E_{KQ}$ ) der Klebschicht unterscheiden. Der Unterschied beim E-Modul ergibt sich dabei aus der Berücksichtigung der Querkontraktionsbehin-

derung in der Klebschicht. Der hier verwendete Wert für  $E_K$  in Tabelle 5.1 ist aus Schubversuchsdaten abgeleitet. Für den Schubversuch ergibt sich keine nennenswerte Querkontraktionsbehinderung, so dass der Tabellenwert für  $E_K$  dem Material Klebstoff entspricht. Laut Habenicht [21] ist dieser reine Materialkennwert für die Betrachtung einer dünnen Klebschicht mit Querkontraktionsbehinderung durch steife Fügepartner nicht anwendbar. Habenicht gibt mit Gleichung 5.2 ein E-Modul  $E_{KQ}$ , welches die Querkontraktionsbehinderung berücksichtigt und damit nicht als Materialkennwert im eigentlichen Sinne zu verstehen ist, sondern als Steifigkeit der gesamten Klebschicht. Der für  $E_{KQ}$  ermittelte E-Modul der Klebschicht ist dabei um mehr als das zehnfache größer als der E-Modul des Klebstoffes.

$$E_{KQ} = \frac{E_K - 4G_K}{\frac{E_K}{G_K} - 3 - \frac{2\nu_S}{E_S}(E_K - 2G_K)} \quad (5.2)$$

Für die zum Vergleich herangezogenen Simulationsergebnisse wird mit den Materialkennwerten aus Tabelle 5.1 gerechnet. Eine Berücksichtigung der Querkontraktionsbehinderung durch Materialparameter ist nicht notwendig, da die diskrete Vernetzung der Klebschicht diese berücksichtigt. Beim Vergleich der beiden analytischen Ergebniskurven in Abbildung 5.1 und 5.2 mit den FEM-Ergebnissen wird deutlich, dass die Querkontraktionsbehinderung zwingend zu berücksichtigen ist. Ohne Berücksichtigung der Querkontraktionsbehinderung ist die Steifigkeit der Klebschicht deutlich zu niedrig, was zur starken Dehnung der Klebschicht führt. Dieses Beeinflusst das Gesamtdehnungsverhalten der Probe, was in Abbildung 5.1 zu erkennen ist. Mit Berücksichtigung der Querkontraktionsbehinderung zeigt sich, dass die analytischen Ergebnisse über der gesamten Probenlänge gut mit den Simulationsergebnissen übereinstimmen (Abweichung im Bereich von 1 % - Abbildung 5.1 und 5.2).

### 5.1.2. Torsionsbelastung

Für reine Torsionsbelastung wird ein ähnlicher Ansatz wie für Zugbelastungen gewählt. Zum Vergleich zwischen analytischer Rechnung und Simulation wird hier die tangentielle Verschiebung diskreter Punkte über der Probenlänge herangezogen. Dazu wird

bei der analytischen Betrachtung in einem ersten Schritt die Verdrehung  $\vartheta$  der Probe berechnet. Dies erfolgt mittels der zweiten Bretschens Formel (Gleichung 5.3) und zunächst bereichsweise (Fügekörper  $\Rightarrow$  Klebschicht  $\Rightarrow$  Fügekörper), bevor diese addiert werden. In Gleichung 5.3 ist  $M_t$  das aufgebrachte Drehmoment (hier  $502\text{ Nm}$ ),  $I_t$  das Torsionsträgheitsmoment und  $z$  der Abstand zur festen Einspannung.

$$\vartheta = \frac{M_t}{GI_t} z \quad (5.3)$$

$$I_t = \frac{\pi D_a^4}{32} \left( 1 - \left( \frac{D_i}{D_a} \right)^4 \right) \quad (5.4)$$

Nach der Berechnung der auftretenden Verdrehung wird am äußeren Durchmesser der Probe die Verschiebung diskreter Punkte bestimmt und über der Probenlänge aufgetragen. In den Abbildungen 5.3 und 5.4 werden die Ergebnisse aus analytischer Rechnung und FEM-Simulation verglichen. Es zeigt sich eine nahezu exakte Übereinstimmung.

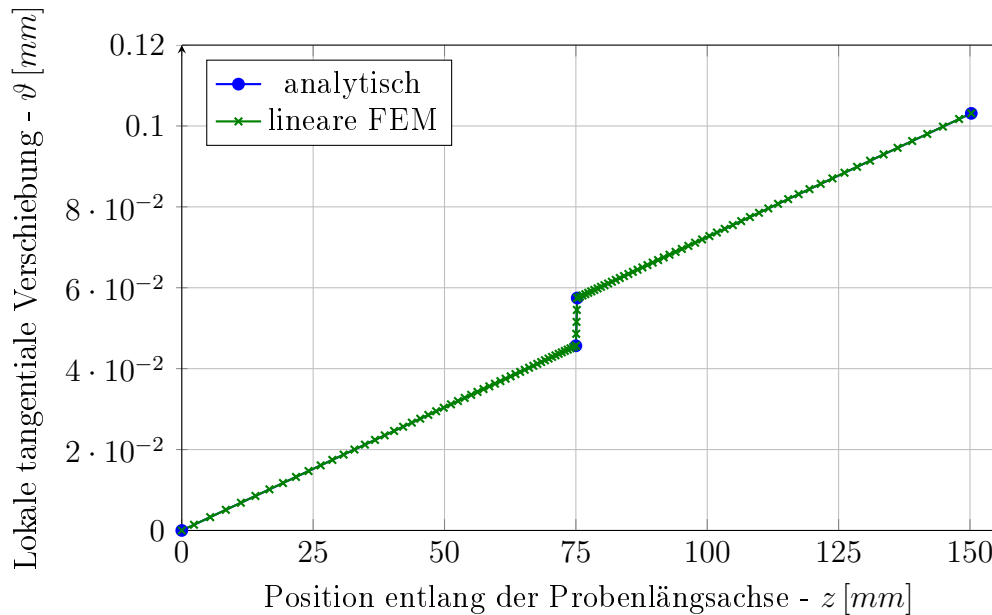


Abbildung 5.3.: Probenverformung unter Torsion - Vergleich FEM zu analytisch (Gesamte freie Länge)

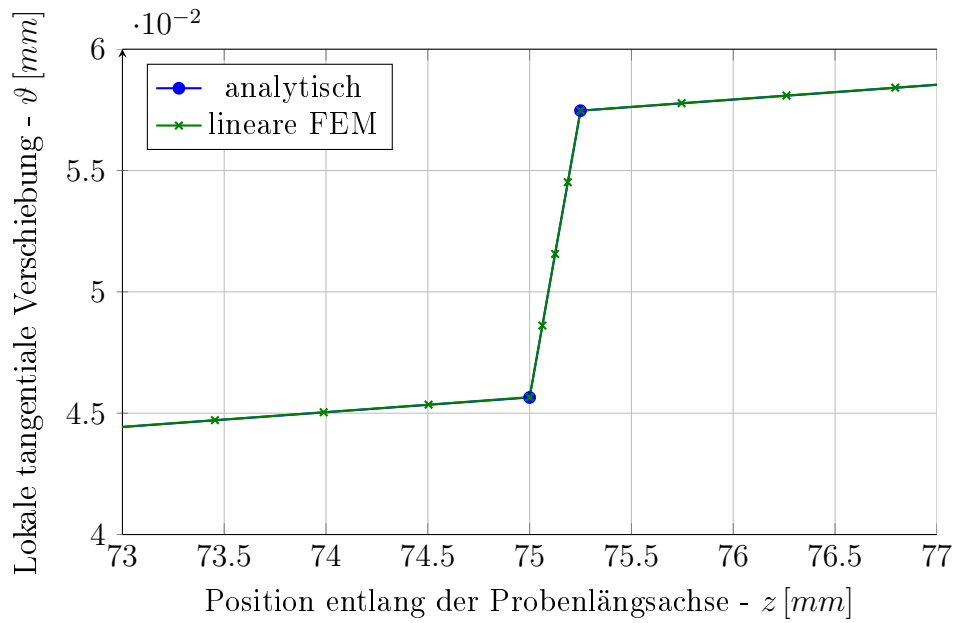


Abbildung 5.4.: Probenverformung unter Torsion - Vergleich FEM zu analytisch (Klebschichtumgebung)

### 5.1.3. Bestimmung der Verschiebungsgesteuerten Lasten

In den späteren Untersuchungen wird nicht die gesamte Probe betrachtet. Es werden Annahmen getroffen, die unter anderem eine Verkürzung des betrachteten Fügepartnerbereiches beinhaltet. Bei einer solchen Verkürzung der Probe bedarf es bei weggesteuerter Rechnung der Proben angepassten Lasten (Verschiebungen). Dies ist notwendig, da die radialen Verschiebungen bei Torsionslast abhängig sind von der Position entlang der Probenlängsachse (wie bei den analytischen Rechnungen zu sehen). In diesem Abschnitt werden diese Verschiebungen bestimmt. Der grundsätzliche Ansatz, die Simulationen weggesteuert zu rechnen, ist dabei naheliegend, da die Lastverhältnisse  $\alpha_{Last}$  über ein Dehnungs-Gleitungsverhältnis definiert sind (Gleichung 4.1 und Tabelle 4.2). Für das Simulationsergebnis macht es für diesen Anwendungsfall keinen Unterschied, ob last- oder weggesteuert gerechnet wird (Kraft oder Verschiebung als Last).

Die Lasten werden mittels der zuvor beschriebenen analytischen Rechnung bestimmt. Dabei wird das Verformungsverhalten der Gesamtproben entlang ihrer Längsachse berücksichtigt, um dieses auf die verkürzten Proben umzurechnen. In drei Schritten wer-

den die Verschiebungen ermittelt, die an den Rändern der verkürzten Modelle aufgebracht werden müssen, um das Verhalten der Gesamtprobe zu repräsentieren. Mit Ausnahme der Klebschichtmaterialdaten werden die Informationen aus Tabelle 5.1 für die Berechnung verwendet. Die drei Schritte sind dabei:

1. Definition der aufzubringenden Dehnungen bzw. Gleitungen.
2. Bestimmen der Last (Kraft/Moment), welche die zuvor definierte Dehnungen bzw. Gleitungen in der Klebschicht hervorruft.
3. Bestimmen der Verschiebungen, die als Last auf das Modell aufgebracht werden.

Im ersten Schritt der Lastermittlung werden auf Basis der Gleichung 4.1 für die unterschiedlichen  $\alpha_{Last}$  Werte eine Dehnung, Gleitung oder eine Kombination von beiden Werten bestimmt. Die Größe der Werte wird dabei auf Basis der im LZS Bericht [24] dargestellten Ergebnisse ausgewählt. Die Dehnungs- bzw. Gleitungswerte werden so gewählt, dass der Verformungsbereich, der im Versuch auftritt (Maximalwerte), auch mit der Simulation abgedeckt wird. Die gewählten Werte sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Beschreibung	Verhältnis $\alpha_{Last}$	Dehnung [-]	Gleitung [-]
Zug	0	0,02	-
Torsion	$\infty$	-	0,15
Zug-Torsion	0,4	0,03125	0,025
Zug-Torsion	1,4	0,03571	0,1
Zug-Torsion	5	0,02	0,2

Tabelle 5.2.: Geforderte Dehnungen und Gleitungen - maximal auftretenden Werte im Versuch

Im zweiten Schritt der Lastbestimmung wird die analytische Herangehensweise aus den vorhergehenden Abschnitt 5.1.2 und 5.1.1 zur Lastbestimmung genutzt. Dazu wird diese invers verwendet, um von den definierten Dehnungen bzw. Gleitungen auf die Lasten zu schließen, die zum Erreichen der geforderten Deformationen notwendig sind. An diesem Schritt der Lastbestimmung zeigt sich eine Abhängigkeit von den Materialdaten der Klebschicht. Je höher die Steifigkeit der verwendeten Materialdaten, desto größer

muss die aufgebrachte Verformung sein, um den gleichen Dehnungs- bzw. Gleitungsbereich wie im Versuch zu erreichen. Um dies sicher zu stellen, werden Maximalwerte für den verwendeten E-Modul angenommen. Diese werden aus den steilsten Anfangssteigungen der Versuchsdaten in Abbildung 4.5 und 4.6 ermittelt und stellen damit ein Extremum und nicht den wahren Wert dar. Dabei ergibt sich für die Torsionsversuche ein Wert von  $E_{Torsionsversuch} = 4597,52 \text{ N/mm}^2$ . Für die Zugversuche wird ein E-Modul  $E_{Zugversuch}$  von  $10490,98 \text{ N/mm}^2$  verwendet. Mit diesen Werten ist sichergestellt, dass der relevante Verformungsbereich dargestellt wird.

Im dritten Schritt der Lastbestimmung wird mit den analytischen Berechnungen aus Abschnitt 5.1.2 und 5.1.1 die im Schritt 2 bestimmte Last in aufzubringende Verschiebungen umgerechnet. Die Verschiebungen sind in Tabelle 5.3 und 5.4 zusammengefasst.

Beschreibung	Verhältnis $\alpha_{Last}$	Läng [mm]	Radial [°]
Zug	0	0,054717702	-
Torsion	$\infty$	-	0,002451886
Zug-Torsion	0,4	0,085496409	0,000437837
Zug-Torsion	1,4	0,097710182	0,001751347
Zug-Torsion	5	0,054717702	0,003502695

Tabelle 5.3.: Aufzubringende Verschiebung für Ring- und Ringsegmentmodell -  $E_{Torsion}$

Beschreibung	Verhältnis $\alpha_{Last}$	Länge [mm]	Radial [°]
Zug	0	0,098403699	-
Torsion	$\infty$	-	0,003904522
Zug-Torsion	0,4	0,15375578	0,000650754
Zug-Torsion	1,4	0,175720891	0,002603015
Zug-Torsion	5	0,098403699	0,00520603

Tabelle 5.4.: Aufzubringende Verschiebung für Ring- und Ringsegmentmodell -  $E_{Zug}$

## 5.2. Allgemeiner Modellaufbau

In diesem Abschnitt wird die Auswahl der Elementierung, Netzfeinheit und Materialmodelle für die im Folgenden verwendeten FE-Modelle dargestellt.

### 5.2.1. Elementierung

Für eine einfache Auswertung der Simulationen ist ein regelmäßiges Netz zweckmäßig. Um ein solches Netz in allen drei Koordinatenrichtungen zu erhalten, werden Elemente in Hexaederform verwendet. Die Netze aller verwendeten FE-Modelle werden dabei auf die selbe Art und Weise erzeugt. Eine Fläche, die dem Querschnitt durch Wandstärke von Fügekörper bzw. Klebschicht entspricht, wird mit 2D Elementen vernetzt. Diese 2D Elemente dienen als Basis zum tangential Extrudieren<sup>1</sup> von 3D Elementen. Der Winkel, um den radial extrudiert wird, ist abhängig vom Idealisierungsgrad (siehe Abschnitt 5.3).

Bei den durchgeführten Simulationen werden hauptsächlich lineare Hexaederelemente verwendet. Bei den Anwendungsfällen, in denen Elemente mit quadratischem Ansatz verwendet werden, wird explizit darauf hingewiesen. Der Unterschied zwischen linearen und quadratischen Elementen besteht in der Ansatzfunktion, mit der die Elementverformung entlang einer Kante beschrieben wird [23]. Wie die Bezeichnung der Elemente schon vermuten lässt, ist dieser Ansatz entweder linear oder quadratisch. Um einen quadratischen Ansatz zu formulieren, wird auf jeder Elementkante ein weiterer Knoten definiert. Somit kann man bei linearen und quadratischen Elementen gleicher Größe von einer Halbierung der Netzfeinheit sprechen. In vielen Anwendungsfällen ist die Verbesserung der Verformungsabbildung, durch den quadratischen Ansatz, jedoch besser als eine Halbierung der Netzfeinheit mit linearen Elementen. Eine Netzfeinheitsuntersuchung ist in jedem Fall auch beim Wechsel zwischen linearen und quadratischen Elementen notwendig.

---

<sup>1</sup>erzeugen mehrere 3D Volumenelemente mit Grundfläche identisch dem 2D Element entlang Rohrradius

### 5.2.2. Modellgliederung

Alle in dieser Arbeit verwendeten FE-Modelle bestehen aus drei Modellgruppen. Dieses sind jeweils eine Gruppe von Elementen für die beiden Fügepartner und eine weitere für die Klebschicht. Die Elemente der einzelnen Gruppen werden über Kontaktbedingungen „permanent verklebt“ (permanent glued contact). Durch MSC.Nastran<sup>©</sup>, den Solver<sup>2</sup> der FEM-Simulation, wird die definierte Kontaktbedingung durch Multi-Point Constraints (MPC) repräsentiert, die die Knoten der Kontaktflächen untereinander verknüpfen.

### 5.2.3. Materialdefinition

Die Materialien Stahl und Klebstoff, aus denen die Proben gefertigt sind, werden als isotrope Werkstoffe angenommen. Für Klebstoff ist dies laut Habenicht [21] eine zulässige Annahme. Hierfür wird im Solver MSC.Nastran<sup>©</sup> die Materialkarte „Mat1“ genutzt. Für den Klebstoff wird zudem ein plastisches Verhalten definiert, dies geschieht über eine zusätzliche Materialkarte „MATEP“, die wiederum auf eine Tabelle („TABLES1“) verweist, in der die Spannungs-Dehnungskurve mit diskreten Punkten beschrieben wird. Für den Stahl muss kein plastisches Verhalten berücksichtigt werden, da der Klebstoff weit unterhalb der Fließgrenze für Stahl versagt.

### 5.2.4. Simulationmethode

Für die Simulationen in dieser Arbeit werden in MSC.Nastran<sup>©</sup> sowohl lineare (Sol101) als auch nichtlineare Solver (Sol400) verwendet. Der Unterschied zwischen linearer und nichtlinearer Simulation besteht hauptsächlich in der verwendeten Steifigkeitsmatrix, die für das FE-Modell aufgestellt wird. Bei einer linearen Simulation ist diese konstant und die Verformung wird direkt für die aufgebrachte Last bestimmt. Bei nichtlinearer Simulation wird die Steifigkeitsmatrix während der Simulation angepasst.

Lineare Simulationen finden in dieser Arbeit Anwendung bei der Netzstudie, die im Abschnitt 5.3 durchgeführt wird. Bei der Netzstudie wird geprüft, ob die Netzfeinheit

---

<sup>2</sup>Software zum Lösen des aufgestellten Differentialgleichungssystems des FE-Modells



das grundlegende Verformungsverhalten abbilden kann. Dazu ist eine Berücksichtigung von Nichtlinearitäten in diesem Arbeitsschritt nicht notwendig. Eine nichtlineare Simulation wird durchgeführt, sobald geometrische Nichtlinearitäten oder nichtlineare Materialeigenschaften zu erwarten bzw. gegeben sind. Unter geometrischen Nichtlinearitäten sind z.B. große Verformungen oder die Simulation von Körperkontakten zu verstehen. Für diese Arbeit ist die Plastizität als nichtlineares Materialverhalten jedoch ausschlaggebend für die Anwendung eines nichtlinearen Solvers.

### 5.3. Simulationsmodelle unterschiedlichen Idealisierungsgrades

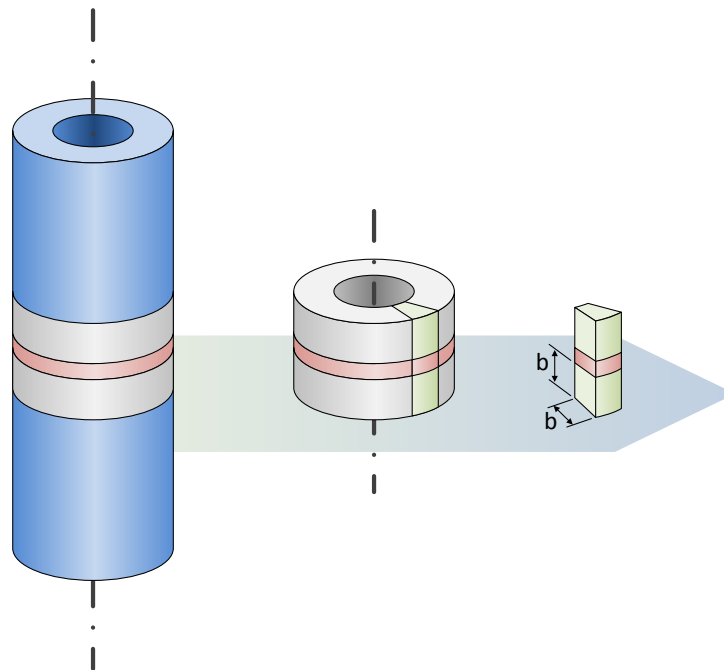


Abbildung 5.5.: Darstellung der unterschiedlichen Idealisierungsstufen - Gesamtmodell (links), Ringmodell (mitte), Ringsegmentmodell (rechts)

In diesem Abschnitt werden die FE-Modelle dargestellt und validiert, welche für die späteren Untersuchungen genutzt werden. Die drei verwendeten Modelle Gesamtmodell, Ringmodell und Ringsegmentmodell unterscheiden sich dabei durch getroffene

Annahmen für Vereinfachungen (Idealisierung). Je mehr Annahmen zur Vereinfachung der Rechenmodelle getroffen werden, desto höher ist der Grad der Modellidealisierung (Idealisierungsgrad). Die Vereinfachung des FE-Modells geschieht in drei Stufen, die in Abbildung 5.5 dargestellt sind (Idealisierungsstufen). Dabei steigt der Idealisierungsgrad von links nach rechts an (Gesamtmodell  $\Rightarrow$  Ringmodell  $\Rightarrow$  Ringsegmentmodell). Bei der Validierung wird überprüft, ob die getroffenen Idealisierungen (reduzierte Probenlänge, Ringsegment, ...) zulässig sind und keinen signifikanten Einfluss auf das Simulationsergebnis aufweisen.

### 5.3.1. Gesamtmodell

In diesem Abschnitt wird das Simulationsmodell der Rohrproben mit dem geringsten Idealisierungsgrad beschrieben. Bei diesem FE-Modell wird die gesamte freie Länge zwischen den Einspannungen modelliert (siehe Tabelle 5.1). Die Netzfeinheit in Klebschicht und Fügekörpern ist dabei im Vergleich zu den folgenden Modellen grob, um die Gesamtanzahl der Elemente in diesem Modell möglichst gering zu halten. Für das Gesamtmodell werden im Rahmen einer Netzfeinheitsuntersuchung zwei Modellvarianten (v1 und v2) betrachtet, die sich durch die Elementkantenlänge der Klebschichtelemente unterscheiden (v1-0,3 mm, v2-0,15 mm). Das Gesamtmodell wird sowohl kraft- als auch weggesteuert gerechnet. Dabei wird die Last (als Verschiebung oder Kraft) auf einen zentralen Knoten aufgebracht, welcher die Last mittels MPC auf die Stirnfläche der Probe überträgt. Auf der zweiten Probenseite wird der gleiche Aufbau mit Zentralknoten und MPC verwendet. Auf dieser Seite wird der Knoten jedoch als Festlager betrachtet und die entsprechenden Freiheitsgrade werden gesperrt. Die Torsions- bzw. Zuglasten, die auf die Probe aufgebracht werden, entsprechen den im Versuch ermittelten Maximallasten unter reiner Torsions bzw. Zuglast (Torsion -  $M_t=502 \text{ N/m} \mid 0,004483^\circ$ ; Zug -  $F_{Zug}=22,2 \text{ kN} \mid 0,03026 \text{ mm}$ ). Die Lasten für die weggesteuerte Rechnung wurden dabei über den analytischen Ansatz in Abschnitt 5.1 bestimmt.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 5.6 für Zuglasten und in Abbildung 5.7 für Torsionslasten dargestellt. Aufgetragen sind in den Diagrammen die von-Mises-Spannung über der Position entlang der Wandstärke der Rohrprobe mittig in

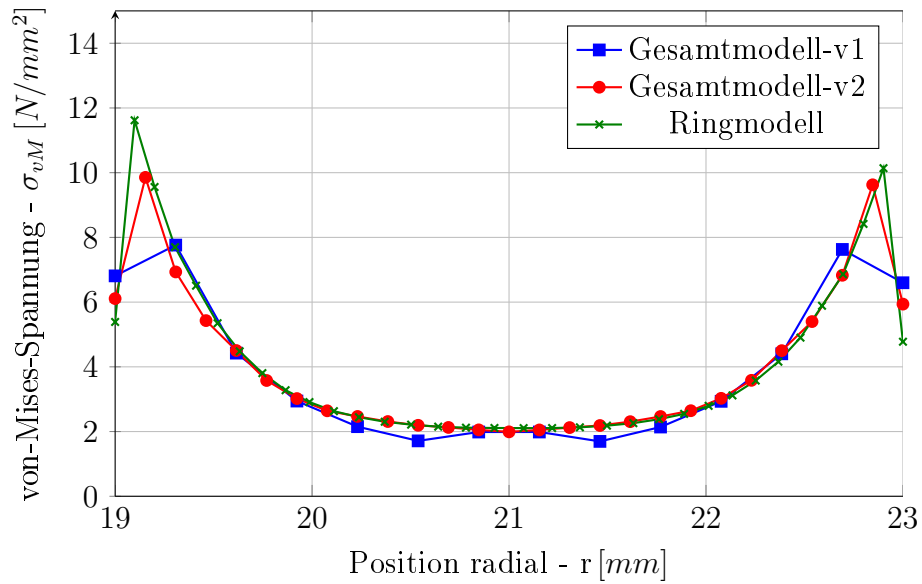


Abbildung 5.6.: von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Zuglast (Ring- und Gesamtmodell)

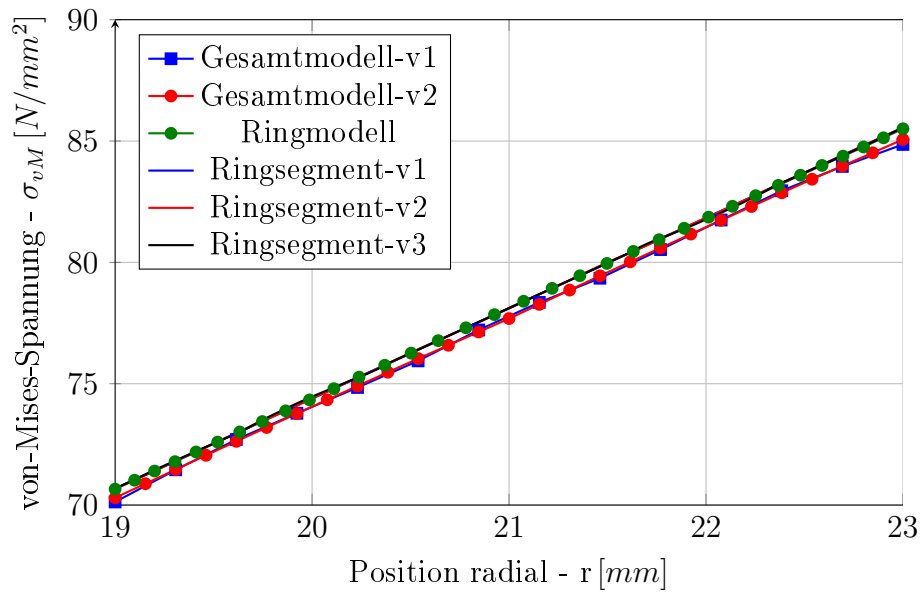


Abbildung 5.7.: von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Torsionslast (Alle Idealisierungsstufen)

der Klebschicht. Auf die Darstellung des Unterschiedes zwischen lastgesteuerten und weggesteuerten Ergebnissen wird verzichtet, da die sich ergebenden Kurven deckungsgleich sind. Für Torsionslasten zeigt sich ein linearer Anstieg der von-Mises-Spannung von Innen- zu Außenkante, dabei ist durch die Netzfeinheit kein signifikanten Ein-

fluss auf Ergebnisse zu erkennen. Die Kurven für alle Idealisierungsstufen und ihre Modellvarianten sind nahezu deckungsgleich. Daher wird die Torsion für die weiteren Idealisierungsstufen nicht weiter betrachtet. Ein geringer Netzeinfluss bei Torsionslast war zu erwarten, da keine lokalen Spannungsspitzen auftreten, die einer Netzverfeinerung bedürfen. Für die Simulationen unter Zuglast sind hingegen deutlich Unterschiede zwischen den beiden Modellvarianten der Gesamtprobe zu erkennen. Bei der Modellvariante v1 ist die zu erwartende Spannungsspitze an Innen- und Außenwand nur rudimentär in Abbildung 5.6 zu erkennen. Bei der Modellvariante v2 ist sie deutlicher ausgeprägt. Die Spannungsspitzen an den Rändern waren zu erwarten, da der Klebstoff mit seiner deutlich geringeren Steifigkeit als die Fügepartner eine Querkontraktionsbehinderung erfährt. Diese induziert die Spannungsspitzen im Nahbereich der Ränder. Eine genaue Darstellung der Vernetzungsstruktur von Klebschicht und angrenzendem Fügepartner ist im Anhang B zu finden.

### 5.3.2. Ringmodell

Für die in Abschnitt 6 und 7 durchgeführten Untersuchungen sind deutliche Verfeinerungen der Vernetzung im Fugebereich notwendig. Daher wird in diesem Abschnitt ein erster Idealisierungsschritt betrachtet. Es wird gezeigt, dass eine Reduktion des Gesamtmodells auf einen flachen Ring für die Fügepartner zulässig ist und einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Klebschichtbelastung hat.

Bei diesem Modell werden die Probekörper auf einen Ring reduziert, der eine Höhe von  $4\text{ mm}$  besitzt (quadratischer Querschnitt  $4 \times 4\text{ mm}$ ). Die Lastaufbringung und Einspannung erfolgt wie beim Gesamtmodell über zwei MPC an den Stirnflächen der Fügepartner. Als Lasten werden die in Abschnitt 5.1.3 ermittelten Verschiebungen aufgebracht. Die detaillierte Vernetzungsdarstellung ist im Anhang C zu finden.

In Abbildung 5.6 sind die Ergebnisse von Ringmodell und Gesamtmodell gegenübergestellt. Das grundsätzliche Spannungsverhältnis in der Klebschicht stimmt mit den Ergebnissen der Gesamtproben überein. Lediglich im Bereich der Ränder gibt es leichte Unterschiede. Hier sind jedoch beide Modelle nicht in der Lage das Verhalten genau abzubilden. Hierfür ist eine weitere Verfeinerung der Klebschichtvernetzung notwen-

dig. Diese wird jedoch, um Rechenzeit zu sparen, an der nächsten Idealisierungsstufe, den Ringsegmenten untersucht.

### 5.3.3. Ringsegmentmodell

In diesem Abschnitt wird ein weiterer Idealisierungsschritt zur Simulation der Versuchsproben dargestellt und validiert. Dieser Idealisierungsschritt ist sinnvoll, da die Netzfeinheit gegenüber dem Ringmodell weiter verfeinert werden muss, um die Spannungsüberhöhungen im Außenbereich der Klebschicht (bei Zuglast) detailliert abzubilden. Bei diesem FE-Modell wird ein Ringsegment von  $2^\circ$  modelliert. Die Schnittflächen des Ringsegmentes (Klebschicht und beide Fügekörper jeweils für sich) werden mit zylindrischen Symmetrierandbedingungen gekoppelt. Um diesen Idealisierungsschritt zu validieren werden die in Tabelle 5.5 aufgelisteten Modelle verglichen. Sie unterscheiden sich in erster Linie durch die modellierte Netzfeinheit. Dabei ist die Netzfeinheit des vernetzten Querschnitts ausschlaggebend. Die Methode, mit deren Hilfe aus diesem Querschnittsnetz (2D) das 3D Modell extrudiert wird, ist in Abschnitt 5.2 beschrieben. In Tabelle 5.5 sind die minimalen Elementkantenlängen aufgelistet. Die genaue Struktur der Vernetzung, die von innen nach außen feiner wird, kann im Anhang D betrachtet werden. Zusätzlich zu einer Netzverfeinerung wird mit Version v5 auch ein anderer Elementtyp für die Klebschicht untersucht. Hierzu wurde für Version v5 das Modell der Version v3 variiert und die Elemente linearen Ansatzes durch einen Typ mit quadratischem Ansatz ersetzt. Der Unterschied zwischen diesen Elementtypen wurde bereits in Abschnitt 5.2 beschrieben. Mit der deutlichen Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit, die quadratische Elemente aufweisen, soll bei gleicher Elementanzahl geprüft werden, ob Version v3 eine ausreichende Netzfeinheit besitzt. Dies ist der Fall, wenn zwischen Version v3 und v5 keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen auftreten.

Bei den Modellen v1 bis v3 wird die Netzfeinheit der Klebschicht sukzessive verfeinert. Die Netzfeinheit der Fügepartner bleibt unverändert. In den Ergebnissen in Abbildung 5.8 ist eine verfeinerte Darstellung der Spannungsspitze an den Rändern zu erkennen. Auch ist zu erkennen, dass das Ringsegmentmodell das gleiche Verhalten

Version	Netzfeinheit Klebschicht	Netzfeinheit Fügekörper	Element Typ
Ringsegment-v1	0,05 mm	0,1 mm	linear
Ringsegment-v2	0,025 mm	0,1 mm	linear
Ringsegment-v3	0,01 mm	0,1 mm	linear
Ringsegment-v4	0,01 mm	0,2 mm	linear
Ringsegment-v5	0,01 mm	0,1 mm	quadratisch

Tabelle 5.5.: Varianten der Ringsegmentvernetzung

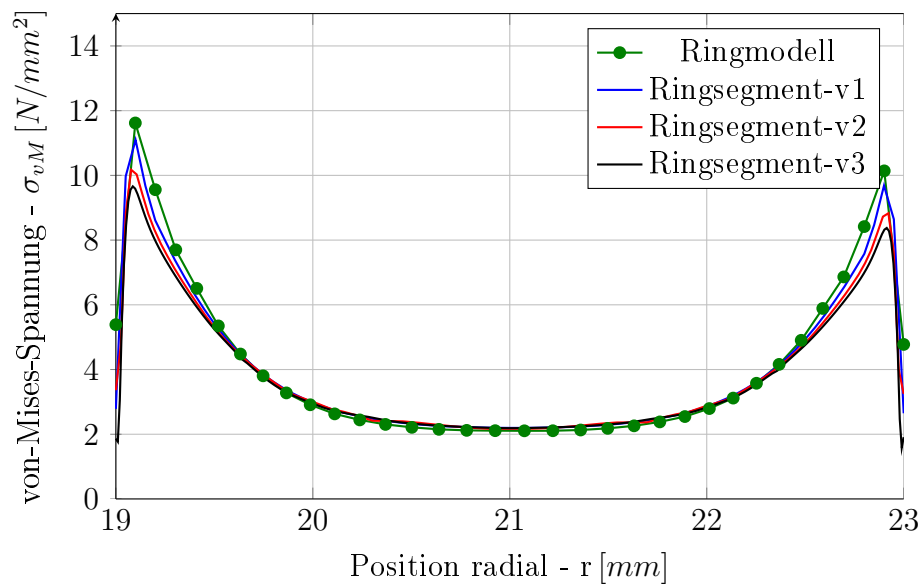


Abbildung 5.8.: von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Zuglast (Ringmodell und Ringsegment)

zeigt wie das Ringmodell und dieser Idealisierungsschritt somit zulässig ist.

In Abbildung 5.9 wird der Einfluss der Netzfeinheit in den Fügepartnern untersucht. Bei Modellversion v4 wurde die Elementgröße der Fügepartner gegenüber v3 verdoppelt. Diese Änderung zeigt jedoch keinen Einfluss. Daher könnte die gröbere Vernetzung aus v4 weiter verwendet werden. Um bei den folgenden Simulation mit Geometrieänderung robust gegenüber Netzeinflüssen zu sein, wird die feinere Vernetzung aus v3 im weiteren verwendet.

Wie zuvor beschrieben wird beim Vergleich von Modellversion v3 und v5 geklärt, ob eine weitere Verfeinerung der Klebschichtvernetzung notwendig ist. In Abbildung 5.10 ist zu erkennen, dass dies nicht der Fall ist. Die Simulationen mit linearen und qua-

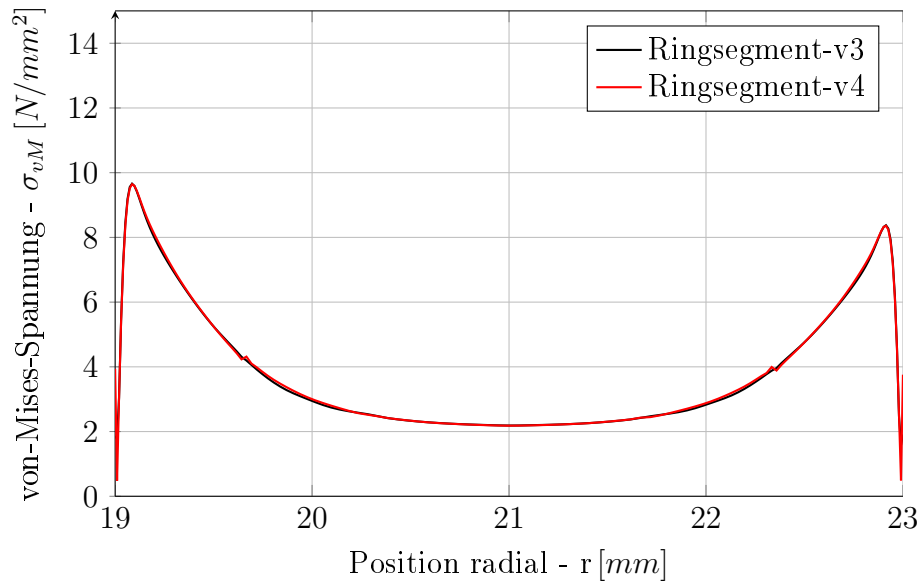


Abbildung 5.9.: von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Zuglast (Untersuchung Netzfeinheit Fügekörper)

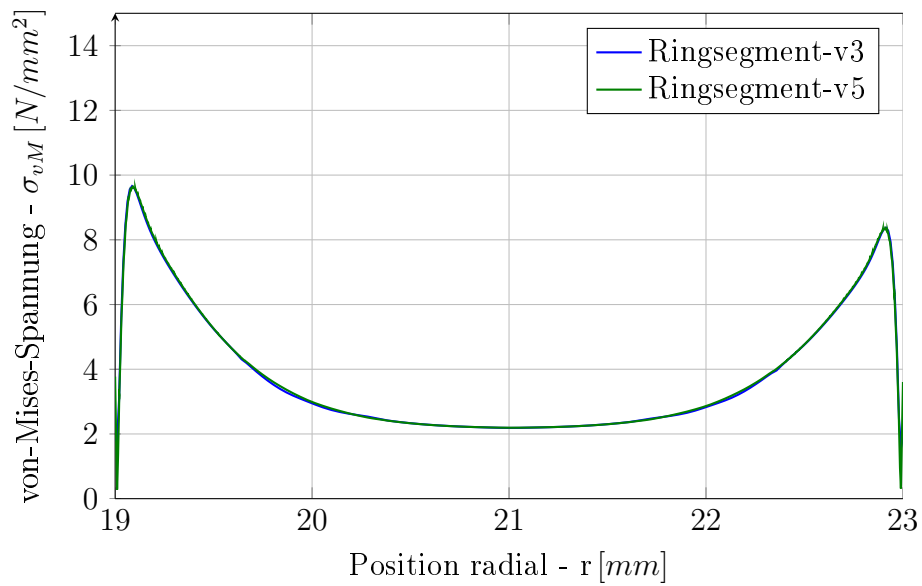


Abbildung 5.10.: von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Zuglast (Elemente mit quadratischem Ansatz)

dratischen Elementen zeigen nahezu deckungsgleiche Simulationsergebnisse. Somit ist die Vernetzung in Version v3 ausreichend fein (Gesamtelementzahl: 124992, Rechenzeit wenige Minuten).

## 5.4. Sensitivitätsuntersuchung des Klebstoffmodells

Ausgehend von einem idealen Probenkörper wird in diesem Abschnitt der Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf das Klebstoffmaterialmodell untersucht. Damit wird gezeigt, welche Möglichkeiten und Grenzen das von-Mises-Materialmodell für die Anwendung bei Klebstoffen aufweist. Die Parameterstudien werden an einem Ringsegmentmodell unter den fünf Lastzuständen durchgeführt, die auch im Test Anwendung finden. Als Eingangsgrößen für das von-Mises-Materialmodell des Klebstoffes werden die sechs verschiedenen Spannungs-Dehnungskurven bzw. Schubspannungs-Gleitungskurven (Umrechnung siehe Abschnitt 3.2.2) verwendet, die in Abschnitt 4.3 definiert sind. Zur Übersichtlichkeit seien hier noch mal die Bezeichnung der einzelnen Materialdatensätze erläutert:

- Zugdaten - Aus Versuch unter reinem Zug ermittelte Spannungs-Dehnungskurven (Gesamt, Min, Max).
- Schubdaten - Aus Versuchen unter reiner Torsion ermittelte Schubspannungs-Gleitungskurven (Gesamt, Min, Max).
- Gesamt - Regressionskurve über alle relevanten Versuche des Lastfalls.
- Min - Regressionskurve eines expliziten Versuchs, der die unterer Grenze der Versuchsergebnisse repräsentiert.
- Max - Regressionskurve eines expliziten Versuchs, der die obere Grenze der Versuchsergebnisse repräsentiert.

### 5.4.1. Auswertung der Simulation

Für die Auswertung der Simulation müssen zwei Größen ermittelt werden. Diese Größen sind die Spannungen und Verformungen in der Klebschicht. Die Spannungen werden dabei über die Kräfte bzw. Momente ermittelt, die an der fest eingespannten Seite der Probe auszulesen sind. Bei der Berechnung von Schubspannung bzw. Spannung aus den ausgelesenen Größen muss berücksichtigt werden, dass es sich bei dem Modell



nur um ein  $2^\circ$  Segment handelt (multiplizieren mit 180). Diese Auswertung entspricht dem Versuch. Auch hier wird die Kraft bzw. das Moment für die gesamte Probe mittels Kraftmessdose gemessen.

Die Verzerrungen werden über die gleiche Methode ermittelt wie im Versuch. Anstelle der Messpunkte des PONTOS Systems werden die Verschiebungen von Knoten ausgelesen. Die Knoten befinden sich auf der Außenseite der Probe in der Mitte des Ringsegmentes auf Höhe der Fügeflächen. Über die ausgelesenen Verschiebungen kann dann, wie im Versuch, mit den Formeln aus Abschnitt 4 die Dehnung bzw. Gleitung ermittelt werden.

#### 5.4.2. Einfluss des Lastfalls

Im diesem Abschnitt wird dargestellt, wie gut das von-Mises-Materialmodell im Allgemeinen für die Simulation von Klebstoffen unter unterschiedlichen Belastungszuständen geeignet ist. Dazu werden die Simulationsergebnisse für Zugdaten-Gesamt und Schubdaten-Gesamt unter allen Lastfälle betrachtet.

Als erstes wird der Schubversuch für Zugdaten und Schubdaten gegenübergestellt. Als Vergleichsgröße werden die Schubdaten-Gesamt (Schubspannungs-Gleitungskurven nicht transformiert) verwendet. Für die Schubdaten-Simulation wird neben der Auswertung im Sinne des Tests auch die direkte Knotenspannung und lokale Gleitung in der Mitte der Klebschicht ausgegeben (FEM-Schubdaten Zentrum).

Die Ergebnisse in Abbildung 5.11 zeigen für die Schubdaten einen bessere Deckung mit den Referenzdaten als für die Zugdaten. Bereits bei geringen Lasten ist ein deutlich steiferes Verhalten der Simulationsergebnisse mit Zugdaten zu erkennen. Im weiteren Verlauf weisen die Zugdaten zudem eine geringere Plastizität auf, wodurch eine höhere Maximalspannung erreicht wird. Für die beiden Schubdatenergebnisse zeigt sich für niedrige Lasten der gleiche Kurvenverlauf, der eine Deckungsgleichheit mit den Versuchsdaten aufweist. Bei höheren Lasten weisen beide Kurven einen ähnliche Kurvenform auf, wobei die Auswertung an der Probenaußenseite höhere Maximalspannungen erreicht. Dieses lässt sich durch die Variation der Schubspannung von Innen- zu Außenradius erklären (etwa 17 % siehe Abbildung 5.7). Durch diese Spannungsverteilung geht

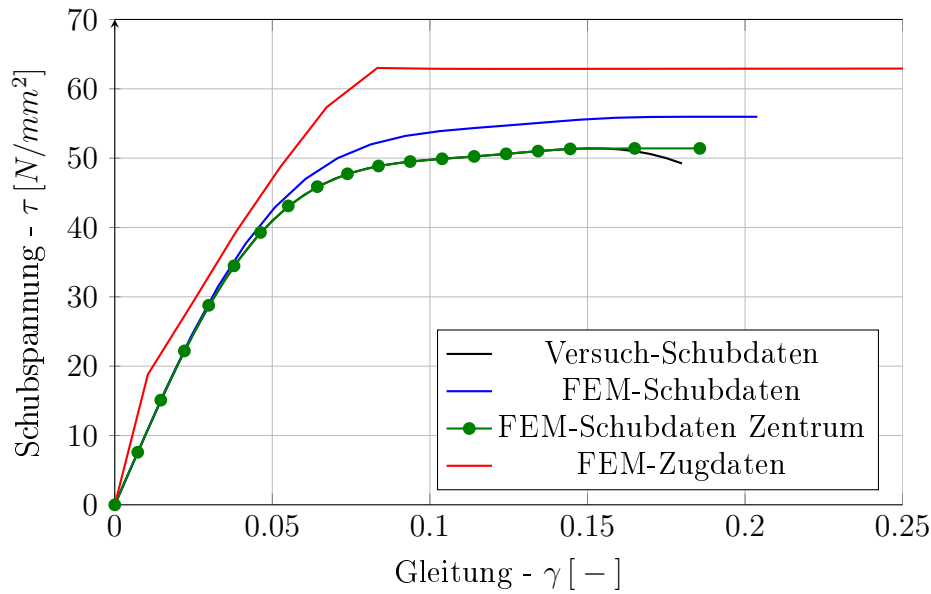


Abbildung 5.11.: Vergleich Eingangsgrößen Materialmodell - Schub- und Zugdaten-Gesamt unter reiner Torsionslast

der Klebstoff im Außenbereich der Probe früher (bezogen auf die aufgebrachte Last) in eine plastische Verformung über als im Innenbereich. Hat die Klebschicht außen bereits die maximale Spannung (durch Eingangsdaten definiert) erreicht und verformt sich nur noch plastisch, so ist dies auf der Innenseite noch nicht der Fall. Bezogen auf die gesamte Probe ist somit eine weitere Laststeigerung möglich, ohne dass sich die gesamte Probe rein plastisch verformt. Eine allgemeine rein plastische Verformung der Probe tritt dann ein, wenn auch die Klebschicht auf der Probeninnenseite die maximale Schubspannung erreicht hat. Bei der in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Methode zur Auswertung wird also die lokale Gleitungsmessung an der Probenaußenseite mit einer gemittelten Schubspannungsmessung kombiniert, was zu der höheren Maximalspannung führt. Für die Ergebniskurve, die eine Auswertung im Zentrum der Probe darstellt, wurden sowohl Schubspannung als auch Gleitung lokal ausgewertet, daher sind Versuchsdaten und Simulationsergebnis deckungsgleich. Aus diesen Ergebnissen ist zu erkennen, dass das von-Mises-Materialmodell in der Lage ist mit Schubdaten für reine Schublasten ein realistisches Materialverhalten abzubilden. Für die Versuchsauswertung ist mit diesen Erkenntnissen zu prüfen, wie bei der Versuchsauswertung die Schubspannungswerte abzumindern sind. Bei der aktuellen Methode wird eine zu hohe

maximale Schubspannung ermittelt.

Nach dem Schubversuch wird nun der Zugversuch betrachtet. Bei diesem Vergleich werden die Zugdaten-Gesamt als Referenz verwendet.

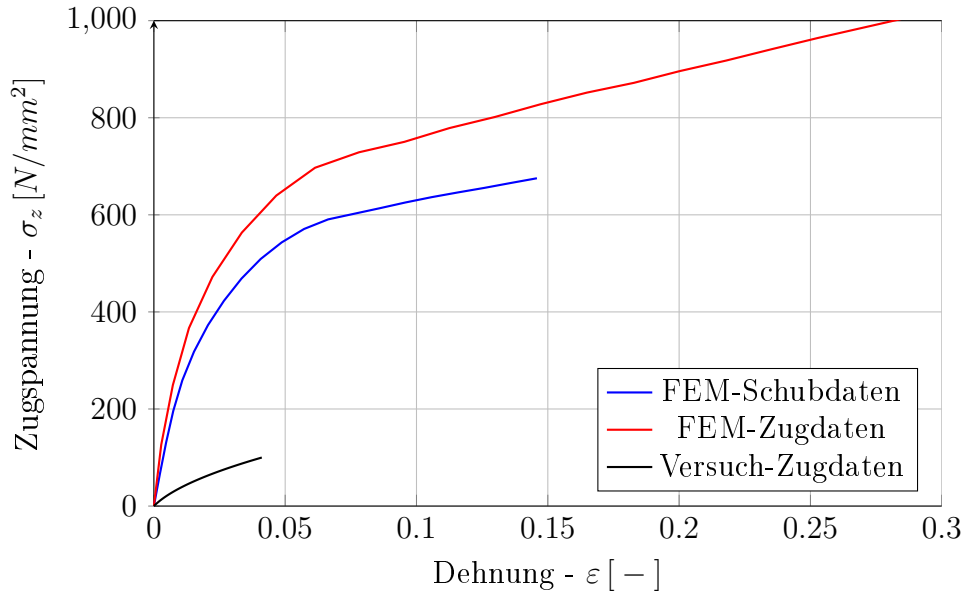


Abbildung 5.12.: Vergleich Eingangsgrößen Materialmodell - Schub- und Zugdaten-Gesamt unter reiner Zuglast

Betrachtet man die Ergebnisse in Abbildung 5.12, so ist deutlich zu erkennen, dass weder Schub- noch Zugdaten ein realistisches Materialverhalten darstellen können. Dies lässt sich durch den hohen hydrostatischen Spannungsanteil in der Klebschicht erklären, der in der Simulation festzustellen ist. Wie in Abschnitt 3 beschrieben ist, tritt unter rein hydrostatischem Spannungszustand beim von-Mises-Materialmodell kein Fließen auf. Dies führt zu den über alle Maßen großen Spannungen, die in den Simulationen ermittelt wurden.

Die Erkenntnisse aus reinem Zug- und Schubversuch spiegeln ebenfalls sich in den Simulationsergebnissen der Versuche unter kombinierter Last wieder. Je höher der Zuglastanteil, desto stärker ist die Abweichung zwischen Versuch (Gesamtregressionsdaten der entsprechenden Lastkombination) und Simulation. Beispielhaft werden hier nur die Ergebnisse zum  $\alpha = 1,4$  Belastungszustand abgebildet (Abbildung 5.13). Die Weiteren Ergebnisse sind im Anhang E zu finden. Für das Spannungs-Dehnungsverhalten in Zugrichtung zeigt sich die deutliche Abweichung, die auch im reinen Zugversuch

zu erkennen sind. Beim Schubspannungsverhalten zeigt sich nach relativ realistischem linearen Bereich ein starkes Abfallen der Spannung auf unrealistische Werte im Druckbereich. Dieses Verhalten lässt sich auf das von-Mises-Materialmodell zurück führen. Unter Zuglast baut sich eine hohe Spannung auf, die einen hohen hydrostatischen Anteil besitzt und somit nicht zum Fließen führt. Im Laufe der Belastungssteigerung steigt auch, insbesondere durch Torsionslast, der deviatorische Spannungsanteil an, was zum Fließen führt. Große plastische Verformungen ergeben sich dann durch die allgemein hohen Spannungen in der Klebschicht bei Fließbeginn. Dadurch lässt sich der Spannungsabfall in der Schubspannungs-Gleitungskurve erklären.

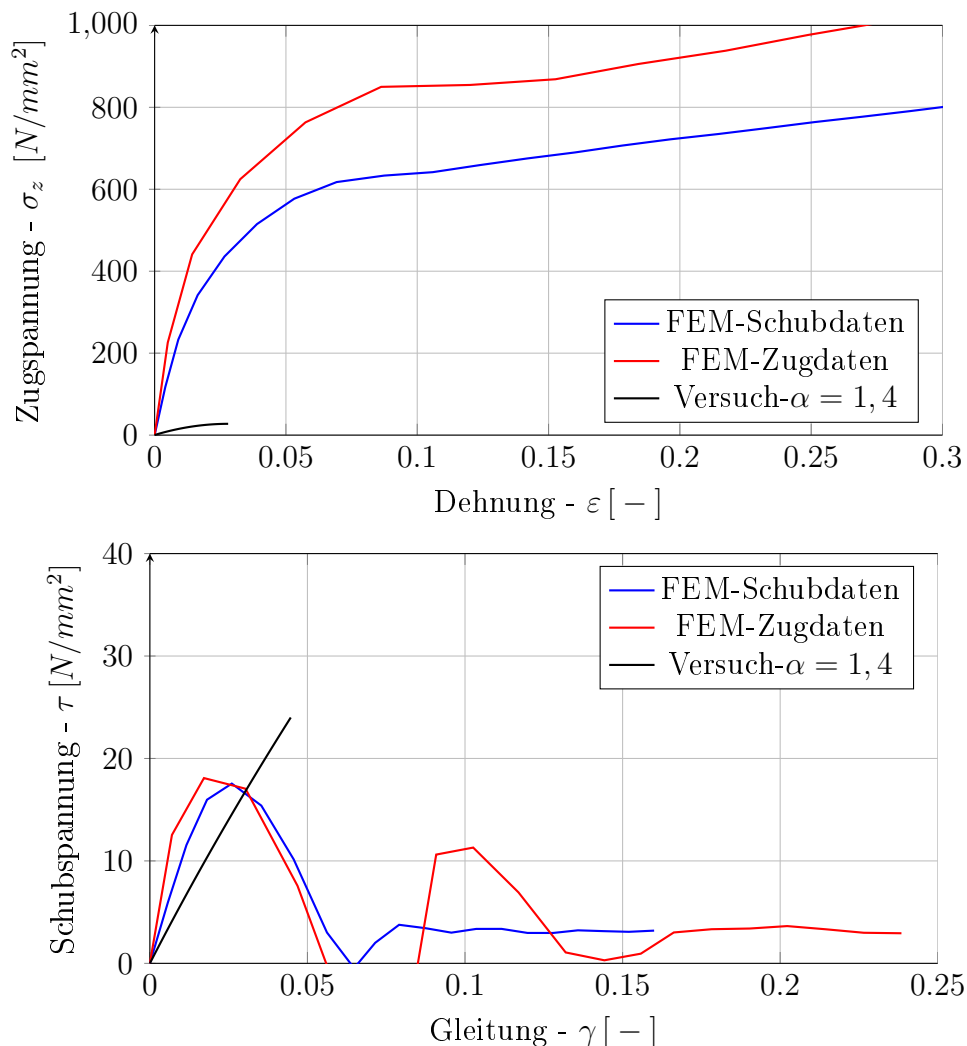


Abbildung 5.13.: Vergleich Eingangsgrößen Materialmodell - Schub- und Zugdaten-Gesamt unter reiner  $\alpha = 1,4$  Lastkombination

### 5.4.3. Einfluss der Eingangsgrößen

In diesem Abschnitt wird gezeigt, welchen Einfluss die Eingangsgrößen des von-Mises-Materialmodells auf das Simulationsergebnis haben. Auf die Darstellung von Simulationsergebnissen soll an dieser Stelle verzichtet werden. Die Simulationen mit den Materialdaten Max und Min haben für die reinen Schubversuche gezeigt, dass sie wie aus dem vorhergehenden Abschnitt 5.4.2 zu erwarten war, die Eingangsgrößen in den Ergebnissen abgebildet werden. Für die Zugversuche ergibt sich das gleiche Bild. Das von-Mises-Materialmodell ist nicht geeignet für Zug dominierte Belastungen von Klebstoffen.

### 5.4.4. Zusammenfassung

Die durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen haben deutlich gezeigt, dass das von-Mises-Materialmodelle lediglich bei reiner Schubbelastung in der Lage ist das Klebstoffverhalten richtig darzustellen. Bereits geringe Anteile an Zuglasten führen zu deutlichen Abweichungen beim Abbilden vom plastischen Verhalten des Klebstoffes.



## 6. Untersuchung von Fertigungseinflüssen

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Fertigungseinflüsse mittels FEM-Simulationen betrachtet. Die Fertigungseinflüsse, die betrachtet werden, sind Eigenspannungen durch den Aushärtezyklus, Poren sowie Fehlpositionierung der Fügepartner zueinander.

### 6.1. Eigenspannungen durch den Aushärtezyklus

Da durch die Materialkombination Stahl-Klebstoff wärmedehungsbedingte Eigenspannungen zu erwarten sind, wird in diesem Abschnitt das Verhalten der Proben nach dem Aushärten und Abkühlen auf Raumtemperatur betrachtet. Der Klebstoff, der zu testen ist, bedarf eines Warmaushärtezyklus bei  $130^{\circ}\text{C}$ . Nach dem Aushärten bei dieser Temperatur wird die Probe wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei diesem Abkühlen entstehen in der Klebschicht Eigenspannungen, die durch die unterschiedlich hohe Wärmedehnung von Klebstoff und Fügepartner entstehen. Mit FEM-Simulationen wird abgeschätzt, welchen Einfluss diese Eigenspannungen auf die Versuchsergebnisse haben.

#### 6.1.1. FE-Modell

Für diese Untersuchung wird das Ringsegmentmodell als Basis verwendet. Abgeändert werden lediglich die Randbedingungen, die jetzt den Fertigungsbedingungen entsprechen müssen, die während der Probenabkühlung herrschen. Die exakten Randbedingungen lassen sich dabei nur sehr schwer und mit großem Aufwand darstellen. Der

Grund hierfür wird im Folgenden dargestellt.

In Abbildung 6.1 ist der Aufbau dargestellt, mit dem die Proben zum Aushärten in den Ofen verbracht werden. In der Abbildung ist eine Klemmung zu erkennen, die aus Aluminium gefertigt ist. Diese wurde angebracht, während die Fügekörper zueinander ausgerichtet und mit einer Schraubzwinge verpresst werden. Nach Anbringung der Klemmen werden Schraubzwinge und Positionierungsvorrichtung entfernt. Die Aluminiumklemmung ist mit Stahlschrauben verspannt.



Abbildung 6.1.: Vorrichtung zum Fügen der Rohrproben [24]

Zur Definition der Randbedingungen muss das unterschiedliche Wärmedehnungsverhalten der beteiligten Materialien betrachtet werden. Stahl hat dabei mit etwa  $12,5 \times 10^{-6} K^{-1}$  die geringste Wärmedehnung im Vergleich zu Aluminium und Klebstoff. Aluminium besitzt eine etwa doppelt so große Dehnung und der Klebstoff sogar eine etwa sechs mal so hohe (siehe Tabelle 6.1). Diese Unterschiede im Wärmedehnungsverhalten führen zum einen zu Eigenspannungen in der Klebschicht, zum anderen bestimmen sie auch die Randbedingungen für die Simulation. Der Unterschied dem Wärmedehnungsverhalten der Metallteile ist für die Randbedingungen dabei ausschlaggebend. Bei Erwärmen der Proben vor Beginn des Aushärtvorganges dehnt sich die Klemmung aus Aluminium entsprechend des Wärmeausdehnungskoeffizienten



doppelt (ideal, Minderung durch Stahlschrauben zum Verspannen) so stark wie die Stahlfügepartner. Die unterschiedliche Wärmedehnung führt somit zu einer Reduktion der Klemmkraft. Da Wärmedehnung in alle Richtungen gleichförmig geschieht, ist zu vermuten, dass die Aluminiumklemmung zudem einen Einfluss auf die vergrößerte Klebschichtdicke hat. Die Aluminiumklemmung schiebt die Fügepartner beim Erwärmen der Probe auseinander. Da der Klebstoff bei der Erwärmung auf Aushärtetemperatur noch viskos ist, führt dieser Effekt nicht zu Eigenspannungen.

Das beschriebene Verhalten der Probe mit Klemmung lässt sich in der FEM nur schwer abbilden. Hierfür müsste die gesamte Probe, sowie die Klemmung inklusive Stahlschrauben unter großem Aufwand modelliert werden. Jedoch würden in diesem Fall zwei weitere wichtige Informationen fehlen. Zum einen fehlt die Kraft, mit der die Klemmung verspannt wird. Zum anderen fehlen die Reibungskoeffizienten für den Kontakt zwischen den Fügepartnern. Da das bisherige Fertigungsverfahren nicht weiterverfolgt wird und eine solche Simulation im Rahmen dieser Arbeit zu aufwendig ist, werden nur die Extrema betrachtet. In einem Extremum ist die Klemmung ideal und die Fügepartner können während der Abkühlung lediglich radial schrumpfen. Beim zweiten Extremum wird eine ungestörte Schrumpfung in axialer und radialer Richtung der Probe erlaubt.

Die Simulation wurde nichtlinear durchgeführt, wobei hier nicht das Plastizitätsverhalten von Materialien abgebildet wird. Die nichtlineare Rechnung ist notwendig, da sich sowohl Steifigkeit als auch Wärmedehnungskoeffizient des Klebstoffes mit der Temperatur ändert. Für eine Simulation des plastischen Materialverhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen fehlen bisher entsprechende Materialdaten. Daher wird bezüglich der Steifigkeit nur der E-Modul mit der Temperatur geändert. Die für die Simulationen verwendeten Daten für den E-Modul wurden mit einer dynamisch-mechanische Analyse (DMA)<sup>1</sup> bestimmt und sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. In der nichtlinearen Simulation wird zwischen den gegebenen Werten linear interpoliert, was den gemessenen DMA Ergebnissen entspricht. Die Daten des variierenden Wärmeausdeh-

---

<sup>1</sup>Methode um durch Deformation viskoelastische Eigenschaften eines Polymers zu ermitteln [21]

nungskoeffizienten werden mit einer thermomechanische Analyse (TMA)<sup>2</sup> ermittelt. Auch diese Werte sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Wie bei den E-Moduln wird auch für den Wärmedehnungskoeffizienten zwischen den beiden gegebenen Werten in der Simulation interpoliert. Beides, Wärmeausdehnungskoeffizienten als auch E-Moduln, wurden im Rahmen des Projektes BOPACS am DLR ermittelt (DMA nach ASTM D5023-01).

Wärmedehnungskoeffizient [ $K^{-1}$ ]	E-Modul [ $N/mm^2$ ]
$72,39 \times 10^{-6}$ ( $-10^\circ C$ )	2950 ( $24^\circ C$ )
$80,6 \times 10^{-6}$ ( $110^\circ C$ )	1550 ( $130^\circ C$ )

Tabelle 6.1.: Temperaturabhängige Materialeigenschaften - EA9695

### 6.1.2. Ergebnisse

Im Folgenden werden die relevanten Ergebnisse der beiden Extrema Rechnungen gegenüber gestellt. Als relevant werden dabei die Spannungen betrachtet, die sich mit den unter Last eingebrachten Spannungen überlagern und damit die Versuchsergebnisse beeinflussen. Dies sind für die Torsionsversuche die entsprechenden Schubspannung sowie die Zugspannungen in den Zugversuchen.

#### *Zugspannung (Zugversuch)*

Betrachtet man die Simulationsergebnisse in Abbildung 6.2 und 6.3, so ist bezüglich der prinzipiellen Spannungsverteilung kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Betrachtet man jedoch die Spannungswerte, so zeigen sich deutliche Unterschiede. Bei der idealen Einspannung ergeben sich Eigenspannungen, die um zwei Zehnerpotenzen höher sind als bei freier Axialverformung. Die hohen Spannungen für ideale Einspannungen liegen weit außerhalb realistischer Werte. Die Simulation ergibt einen Wert von etwa  $400 N/mm^2$  (Klebschichtmitte), der verwendete Klebstoff versagt jedoch bereits bei Werten von etwa  $40 N/mm^2$  (siehe Abbildung 4.5). Die bei freier axialer Verformung ermittelten Spannungen liegen in der Klebschicht mit etwa  $5 N/mm^2$  in einer

---

<sup>2</sup>Verfahren zur Ermittlung von Längen- und Volumenänderung eines festen Körpers in Abhängigkeit von der Temperatur [21]



### *Schubspannung (Torsionsversuch)*

Bei der Betrachtung der Schubspannungskomponente kann auf eine bildliche Darstellung verzichtet werden. Die Schubspannung ist für beide Formen der Randbedingungen nahe Null und über der Klebschicht konstant. Somit ist eine geringe Beeinflussung der Versuchsergebnisse unter Torsionslast zu erwarten.

### **6.1.3. Zusammenfassung**

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmedehnung bei der Probenfertigung eine wichtige Einflussgröße darstellt. Dies gilt insbesondere für Zugproben, bei denen die auftretenden Eigenspannungen in der selben Wirkrichtung orientiert sind, wie die aufgebrachten Lasten. Für die restriktivere Annahme der Randbedingungen überschreiten die Eigenspannungen dabei deutlich den linear-elastischen Verformungsbereich. Ohne geeignetes Materialmodell und entsprechende temperaturabhängige Materialdaten lässt sich das genaue Verhalten schwer abschätzen. Es ist jedoch zu vermuten, dass in der Klebschicht bei Sperrung der axialen Verschiebung während des Abkühlens bereits deutliche plastische Verformungen eintreten würde. Auch für die Annahme mit freier Längsdehnung sind signifikante Spannungen vorhanden, welche mit einem Achtel der maximal gemessenen Spannungen einen deutlichen Einfluss auf die Versuchsergebnisse vermuten lassen. Es sind jedoch geringe bis keine plastischen Verformungsanteile während des Abkühlens zu erwarten.

Die vermuteten realen Randbedingungen liegen zwischen den betrachteten Extrema. Somit ist ein großer Einfluss auf das Probenverhalten zu erwarten. Dieses müsste in weiteren Untersuchungen betrachtet werden, was besonders wegen der temperaturabhängigen Materialdaten sehr aufwendig ist. Sinnvoller ist es daher das Fertigungsverfahren anzupassen oder ein anderes Material für die Fügepartner zu wählen, welches einen ähnlichen Wärmedehnungskoeffizienten besitzt wie der Klebstoff.

## 6.2. Fügekörper Positionierung

In diesem Abschnitt wird betrachtet, wie sich geometrische Fertigungsabweichungen auf die Versuchsergebnisse auswirken. Dabei werden zwei Arten von Versatz der Fügepartner zueinander betrachtet. Zum einen das Verkippen der Probekörper zueinander (Winkel zwischen Rotationsachsen), zum anderen der seitliche Versatz der Probekörper (Rotationsachsen parallel aber verschoben). Beide Arten des Versatzes führen beim Einspannen der Proben zu Eigenspannungen in der Probe. Diese werden induziert, wenn die Einspannung die Rotationsachsen der Fügepartner in eine zueinander fluchtende Ausrichtung zwingt. Diese Eigenspannungen werden hier exemplarisch betrachtet, um ihren Einfluss auf die Versuchsergebnisse abzuschätzen. Basis der Fertigungsabweichungen, die betrachtet werden, sind die durch die DIN EN 14869-1 [16] gegebenen zulässigen Fertigungsabweichungen der Proben. Das Verhalten der Klebschicht wird dabei global betrachtet, da diese Fertigungsabweichungen zu variierenden Belastungen entlang der Klebschicht führen.

### 6.2.1. FE-Modell

Als FE-Modell wird das Ringmodell verwendet, um die Spannungsverteilung in der gesamten Klebschicht abbilden zu können. Die gröbere Vernetzung (im Vergleich zum Ringsegmentmodell) ist für diese Untersuchung ausreichend, da nur eine globale Betrachtung der Spannung das Ziel ist. In Abschnitt 5.3 wurde gezeigt, dass die mittleren Spannungen gut vom Ringmodell abgebildet werden, lediglich die Spannungsspitzen (unter Zuglast) an den Rändern bedürfen einer feineren Vernetzung.

Auf Basis des FE-Modells, welches in Abschnitt 5.3.2 Verwendung findet, werden zwei neue Modelle erstellt. Dabei wird einer der Fügepartner verschoben beziehungsweise seine Rotationsachse verkippt. Die Werte von Verschiebung und Verkipfung ergeben sich aus DIN EN 14869-1 [16]. Dort sind maximale Werte für diese Fertigungsabweichungen gegeben. Für die seitliche Verschiebung der Fügepartner ist ein maximaler Versatz der Fügepartner vom 0,002-fachen des Außenradius zulässig (hier  $0,046\text{ mm}$ ). Für das Verkippen der Fügepartner ist der Winkel darüber definiert, dass

die Klebschichtdicke durch Verkippen nicht mehr als 5 % von der empfohlenen Dicke abweicht. Damit ergibt sich für eine Klebschichtdicke von  $0,25\text{ mm}$  und den Außenradius von  $23\text{ mm}$  ein Winkel von  $0,031^\circ$ .

Die Simulation wurde linear durchgeführt, somit wird keine Plastizität des Klebstoffes berücksichtigt. Für eine Betrachtung des globalen Einflusses ist diese Wahl ausreichend, zumal das zur Verfügung stehende von-Mises-Materialmodell nur für sehr begrenzte Lastfälle realistisches Materialverhalten widerspiegelt (siehe Abschnitt 5).

Die Lasten werden als Verschiebungen bzw. Rotationen aufgebracht. Diese Lasten sind so gewählt, dass die Rotationsachsen der Fügekörper bei voller Last übereinander liegen.

### 6.2.2. Ergebnisse

Hier werden die Ergebnisse der entsprechenden Simulationen dargestellt. Begonnen wird mit den Ergebnissen zur Verkipfung der Fügepartner zueinander.

#### *Verkippen der Fügekörper*

In Abbildung 6.4 ist die Klebschicht mit der auftretenden Spannung in axialer Richtung (in Richtung der Rotationsachse) dargestellt. Deutlich sind die Zug und Druckbereiche der Spannung auf beiden Seiten der Rotationsachse zu erkennen, um welche die Last aufgebracht wurde. Die auftretenden Lasten sind mit über  $300\text{ N/mm}^2$  sehr hoch. Was allerdings an Hand der zulässigen 5 % Dickenabweichung zu erwarten war. Die 5 % Dickenabweichung führen beim Einspannen zu einer genau so hohen prozentualen Dehnung. Diese liegt mit 5 % bei etwa dem fünffachen der maximalen Dehnung die unter Zuglast im Versuch aufgetreten ist.

#### *Verschieben der Fügekörper*

Auch für die Verschiebung der Probekörper zueinander zeigen sich hohe Spannungen in der Klebschicht (siehe Abbildung 6.5). Kritisch ist hier die Schubspannungskomponente, die bei Torsionslast dominierend ist. Diese sind mit etwa  $380\text{ N/mm}^2$  ebenfalls

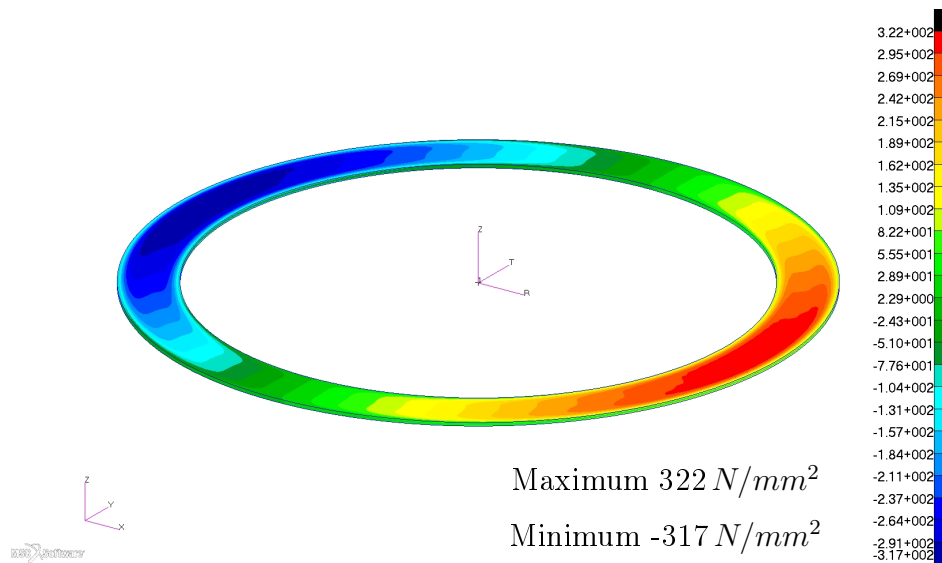


Abbildung 6.4.: Axiale Spannung in der Klebschicht durch Verkipfung der Fügepartner zueinander (im zylindrisches Koordinatensystem)

sehr hoch. Auch diese lassen sich mit einer kurzen analytischen Betrachtung erklären. Fasst man die Fügekörperverschiebung von  $0,046 \text{ mm}$  als lokale Verschiebung der beiden Fügekörper zueinander auf, so kann mit der Auswertung in Abschnitt 4 und der Klebschichtdicke von  $0,25 \text{ mm}$  eine Gleitung von  $0,184$  bestimmt werden. Dieser Wert liegt im Bereich des Maximums der im reinen Schubversuch ermittelt wurde.

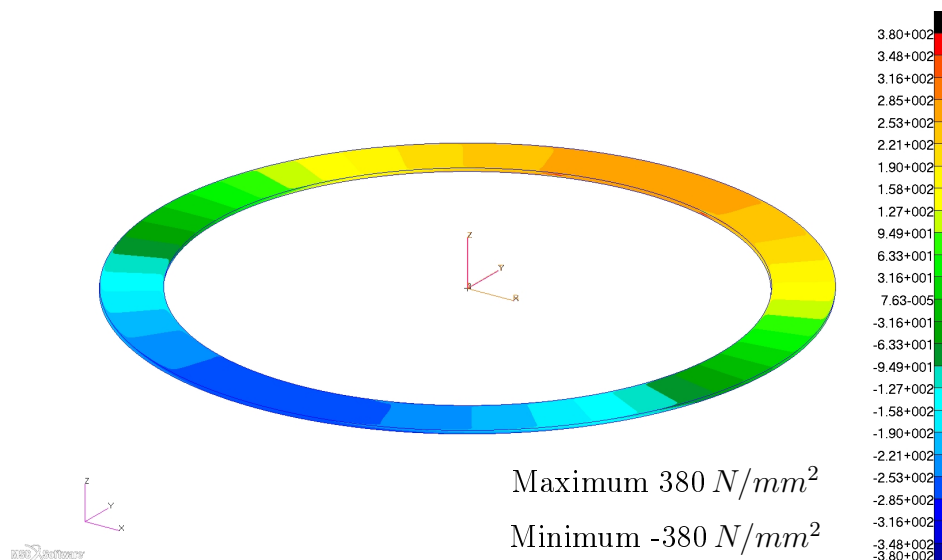


Abbildung 6.5.: Tangentiale Schubspannung in der Klebschicht durch Verschiebung der Fügepartner zueinander (im zylindrisches Koordinatensystem)

### 6.2.3. Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass schon kleine Abweichungen der Fertigungsgenauigkeit der Proben zu hohen Vorspannungen in der Klebschicht führen können. Zudem zeigt die Größe der Spannungen, dass die Vorgaben aus der Norm [16] auf die hier getesteten Proben nicht anwendbar sind. Die zulässigen Formabweichungen der Proben führen zu Spannungen, die dem Maximum im Versuch entsprechen bzw. weit oberhalb liegen. Die Fertigungstoleranz der Proben muss daher deutlich kleiner gewählt werden. Sie sollte sich an der im Versuch zu erwartenden maximalen Dehnung bzw. Gleitung orientieren.

Des weiteren sei noch erwähnt, dass bei den in diesem Abschnitt durchgeführten Untersuchungen von einer exakt ausgerichteten Prüfmaschine ausgegangen wird. Dabei fluchten die Einspannungen zu hundert Prozent. Ist dies nicht der Fall, so kann es auch bei exakt gefertigten Proben zu ähnlichen Effekten kommen wie in diesem Abschnitt beschrieben. Die Proben würden durch zueinander verkippte oder verschobene Klemmungen bereits beim Einspannen belastet.

## 6.3. Poren

Poren sind als Fertigungsabweichung schwer zu betrachten, da Größe, Form und Verteilung in der Klebschicht stark schwanken können. Die Betrachtung des Poreneinflusses auf die Messergebnisse müsste daher über statistische Ansätze geschehen. Hierfür sind jedoch die wenigen Schnittbilder aus unterschiedlichen Proben (Abbildung 4.2) nicht repräsentativ. Informationen entlang der gesamten Klebschicht mehrerer Proben wären notwendig. Da diese Informationen nicht zur Verfügung stehen, soll an dieser Stelle der lokale Effekt einer Pore in der Klebschicht betrachtet werden. Damit ist eine qualitative Abschätzung des Einflusses von Poren möglich.

### 6.3.1. FE-Modell

Für diese Untersuchung wurde das Ringsegmentmodell als Basis genutzt. Um jedoch Randeffekte zwischen Pore und Segmentrand zu vermeiden, wurde das Ringsegment



von  $2^\circ$  auf  $4^\circ$  erweitert. Als Lasten werden reine Zug- und Schublasten betrachtet. In der Mitte der Klebsicht wurde die Pore eingebracht. Die Pore wurde als gleichförmig rund angenommen und seine Abmaße aus Abbildung 4.2 abgeleitet. Die generische Form der Pore (Querschnitt) ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Da in der Natur vornehmlich stetige Geometrien auftreten, wurde die generische Kontur über einen Polynomzug (Spline) definiert. Die Position der Stützstellen sind mit roten Punkten auf einem viertel der Kontur exemplarisch dargestellt. Ein Rotationskörper aus dieser Kontur beschreibt das Volumen der Pore.

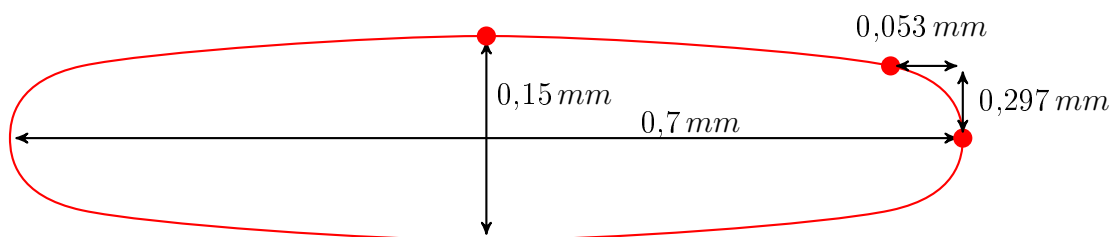


Abbildung 6.6.: Geometrie der im FE-Modell eingebrachten Pore

### 6.3.2. Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse in Abbildung 6.7 und 6.9 zeigen eine lokale Beeinflussung der Spannungsverteilung in der Klebschicht. Insbesondere bei Torsionslast in Abbildung 6.9 ist zu erkennen, dass das Spannungsverhalten außerhalb des Poren-Nahbereichs unverändert ist. An den Rändern der Poren treten hohe Spannungspitzen auf, wie in Abbildung 6.8 und 6.10 erkennbar ist. In diesen Abbildungen ist auch der Vergleich mit einer ungestörten Klebschicht gezeigt.

### 6.3.3. Zusammenfassung

Aus dieser Untersuchung lassen sich nur wenig Informationen über den Einfluss auf das gesamt Versuchsverhalten ziehen. Jedoch zeigt sich, dass Poren lokale Spannungsüberhöhungen erzeugen. Daraus lässt sich ableiten, dass diese Spannungsspitzen den Versagenszeitpunkt als Rissinitiationspunkt beeinflussen. Eine Porenposition am Rand

der Klebschicht sollte diesen Effekt, insbesondere beim Zugversuch, noch verstärken. An dieser Position überlagern die Spannungsspitzen von Pore und Klebschichtauslauf.

Der Einfluss von Poren bezüglich der Reduktion der Fügefläche wurde bereits in Abschnitt 4 beschrieben.

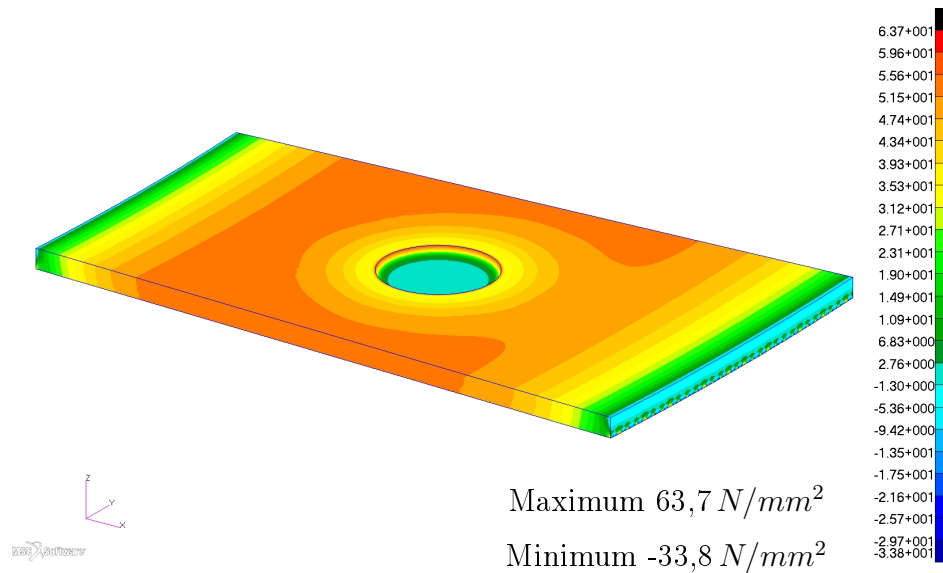


Abbildung 6.7.: Axiale Spannung unter Zugbelastung (im zylindrisches Koordinatensystem)

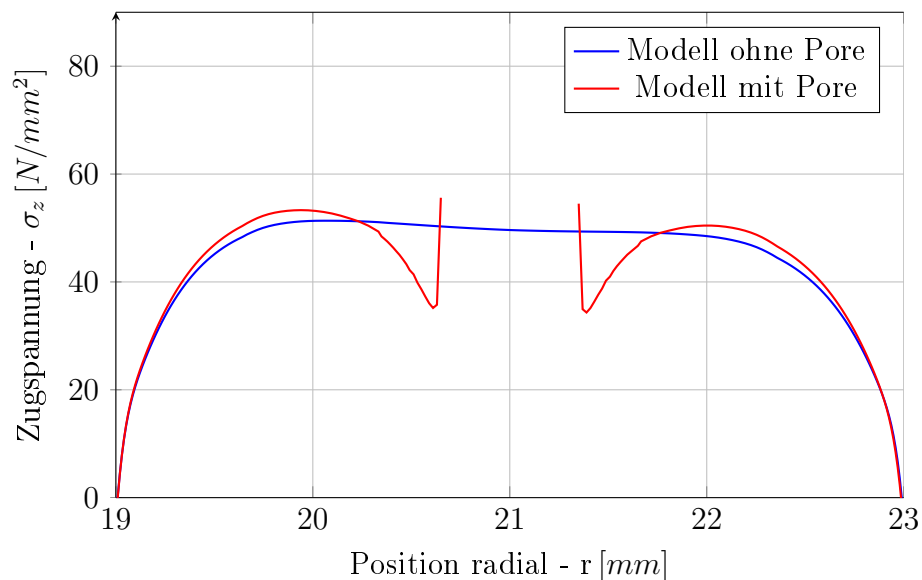


Abbildung 6.8.: Axiale Spannung unter Zugbelastung - Schnittbetrachtung (Mittelknoten der Klebschicht im zylindrisches Koordinatensystem)

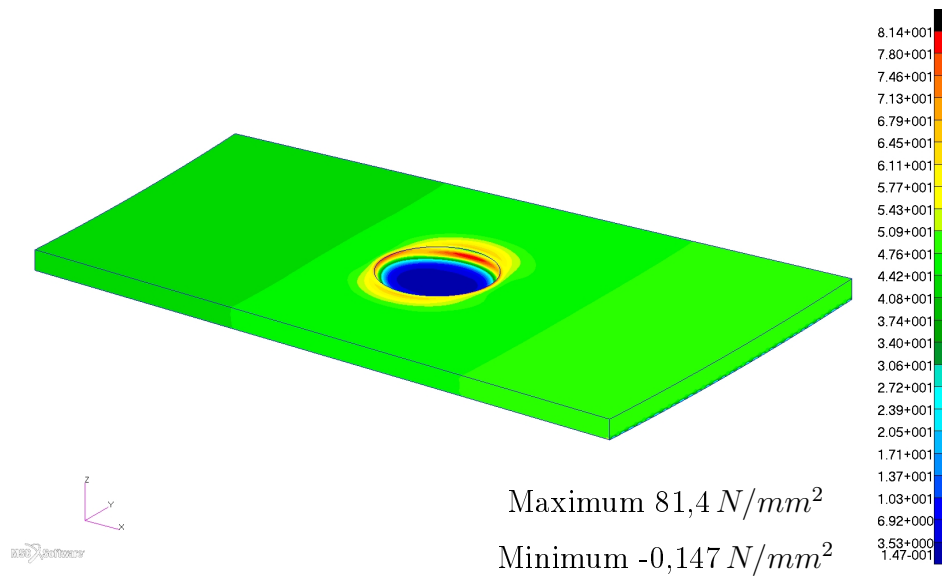


Abbildung 6.9.: Tangentiale Schubspannung unter Torsionsbelastung (im zylindrisches Koordinatensystem)

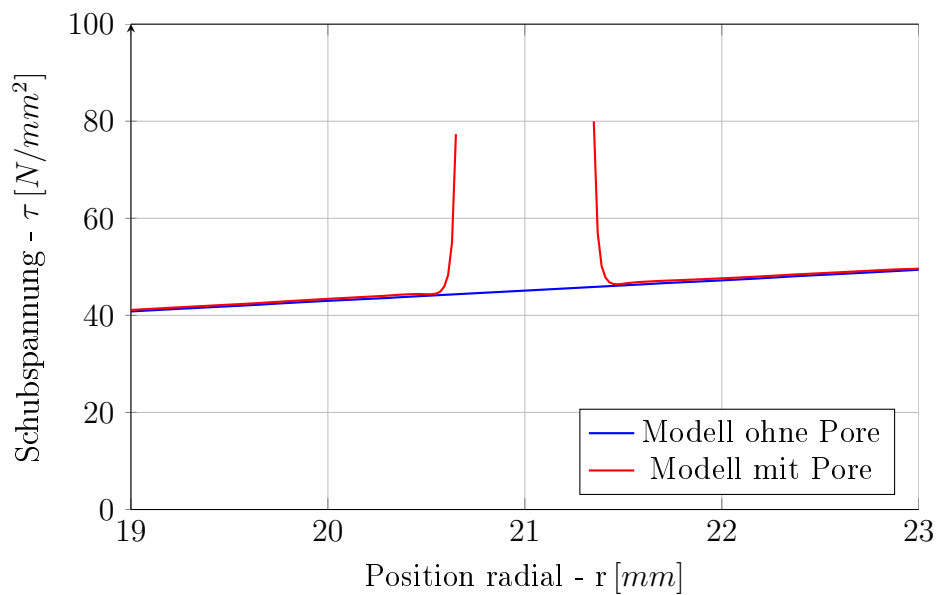


Abbildung 6.10.: Schubspannung unter Torsionsbelastung - Schnittbetrachtung (Mittelknoten der Klebschicht im zylindrisches Koordinatensystem)

## 6.4. Bewertung der Fertigungseinflüssen

Um einen Überblick über die hier betrachteten Fertigungseinflüsse zu bekommen, werden die Ergebnisse in diesem Abschnitt zusammengefasst. Unter den Fertigungseinflüssen erscheint die Eigenspannungen durch den Aushärtezyklus am kritischsten, da diese

nur bis zu einem gewissen Grad reduziert werden können. Die verbleibenden Eigenspannungen sind dabei durch die Materialkombination von Klebstoff und Fügekörpern definiert. Die optimale Wahl eines Fügekörperwerkstoffes mit gleichem Wärmeausdehnungskoeffizienten wie der Klebstoff, ist dabei durch die Vorgabe kleiner Fügekörperdehnungen im Test begrenzt. Die Spannungen die bei der Einspannung der Proben in die Prüfmaschine auftreten, lassen sich hingegen theoretisch auf Null reduzieren. Hierfür muss die Probe exakt gefertigt sein und die Probeneinspannung der Prüfmaschine fluchten. Durch Änderung des Fertigungskonzeptes kann auch die Problematik der Poren reduziert werden. Treten nur noch vereinzelte Poren auf, so lassen die in diesem Abschnitt gezeigten Simulationsergebnisse, auf geringe Einflüsse bezüglich des Spannungs-Dehnungsverhaltens schließen. Ein stärkerer Einfluss ist jedoch bezüglich der Versagensdehnung zu erwarten.

## 7. Parameterstudie zum Einfluss der Probengeometrie

In diesem Abschnitt werden Ansätze betrachtet, auf welche Art die Probengeometrie abgeändert werden kann, um eine konstante Spannungsverteilung in der Klebschicht zu erhalten. Diese Änderungen beziehen sich dabei insbesondere auf die Spannungsverteilung unter Zugbelastung. Hierzu wurde im Abschnitt 5 gezeigt, dass am Klebschichtauslauf Spannungskonzentrationen auftreten. Diese gilt es zu reduzieren, um einen möglichst ungestörten Spannungszustand im Versuch zu messen.

### 7.1. Fasen an den Fügepartnern

Eine Möglichkeit die Spannungsspitzen an den Klebschichtausläufen zu reduzieren, ist das Aufweiten des Fügespalt an den Rändern. Dadurch wird die Querkontraktionsbehinderung reduziert, welches den Grund für die auftretenden Spannungskonzentrationen darstellt.

#### 7.1.1. FE-Modell

Als Ausgangsmodell für diese Untersuchungen wird das Ringsegmentmodell verwendet. Diese Untersuchung ist für zukünftige Versuche gedacht, bei denen die Probenfertigung verbessert werden soll. Da bei einer fehlerfreien Fertigung eine Klebschichtdicke von etwa  $0,15\text{ mm}$  erwartet wird, wird das bisher verwendete Modell dementsprechend abgeändert. Mit der Basiskonfiguration ideal senkrechter Kanten wird eine lineare Simulation für reine Zug- und Schublast durchgeführt. Diese Simulationsergebnisse dienen

als Referenz für alle folgenden Geometrievariationen (Legende = “Referenz”).

Wie bereits beschrieben, wird die Klebschicht bei dieser Untersuchung an den Klebschichtausläufen durch Fasen (an Innen- und Außenradius identisch) aufgeweitet. Der Beginn der Fase ist dabei um das Maß der Klebschichtdicke nach Innen verschoben, wie in Abbildung 7.1 dargestellt wird. Es werden hier die drei Fasen mit unterschiedlichem Winkel verglichen, die in Abbildung 7.1 (Innen- und Außenseite identisch) zu erkennen sind. Die Fasen mit  $70^\circ$  und  $80^\circ$  untersuchen dabei die Möglichkeit die Spannungsverteilung zu beeinflussen. Die  $45^\circ$  Fase hingegen stellt einen Fertigungsaspekt da. Eine solche Fase wird üblicherweise beim Entgraten eines zerspanungsmechanisch bearbeiteten Bauteils gefertigt. Ein Bauteil wird sowohl aus Gründen der Verletzungsgefahr als auch zum Verhindern von Stoßschäden der Kanten entgratet.

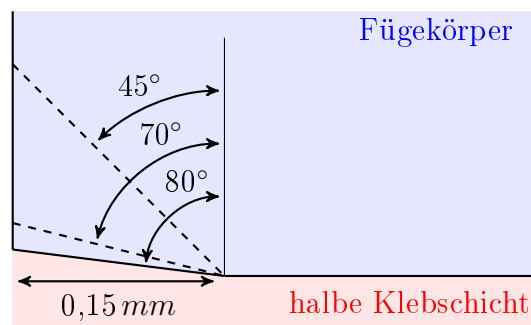


Abbildung 7.1.: Geometrie der untersuchten Fasen - halbe Ringbreite dargestellt (an Innen- und Außenradius identisch)

### 7.1.2. Ergebnisse

Bei der Auswertung dieser und der folgenden Untersuchungen werden die von-Mises-Spannung sowie die hydrostatische Spannung über der Ringbreite betrachtet. Wie in Abschnitt 3 dargelegt wurde, sind die von-Mises-Spannung und hydrostatische Spannung in Kombination repräsentativ für das Klebstoffverhalten. Für das Auswertungsverfahren, welches in Abschnitt 4 erläutert ist, wird eine konstante Spannung über der Klebschicht angenommen. Das Ziel der folgenden Untersuchungen ist es, dieser Annahme möglichst nahe zu kommen.

Die Ergebnisse in Abbildung 7.2 zeigen eine leichte Reduktion der Spannungspitzen

bei der von-Mises-Spannung und ein Verschieben des Maximalwertes in Richtung Ringmitte. Das Maximum, was bei der Referenzgeometrie am Klebschichtauslauf induziert wird, verschiebt sich an den Fasenanfang. Dies ist anhand der kleinen Spannungsspitzen am äußersten Rand zu erkennen. Für den hydrostatischen Spannungsanteil zeigt sich für alle Variationen ein negativer Einfluss, da der Verlauf über der Ringbreite weniger homogen wird. Zudem steigt das Maximum der von-Mises-Spannung mit zunehmenden Fasenwinkel wieder an.

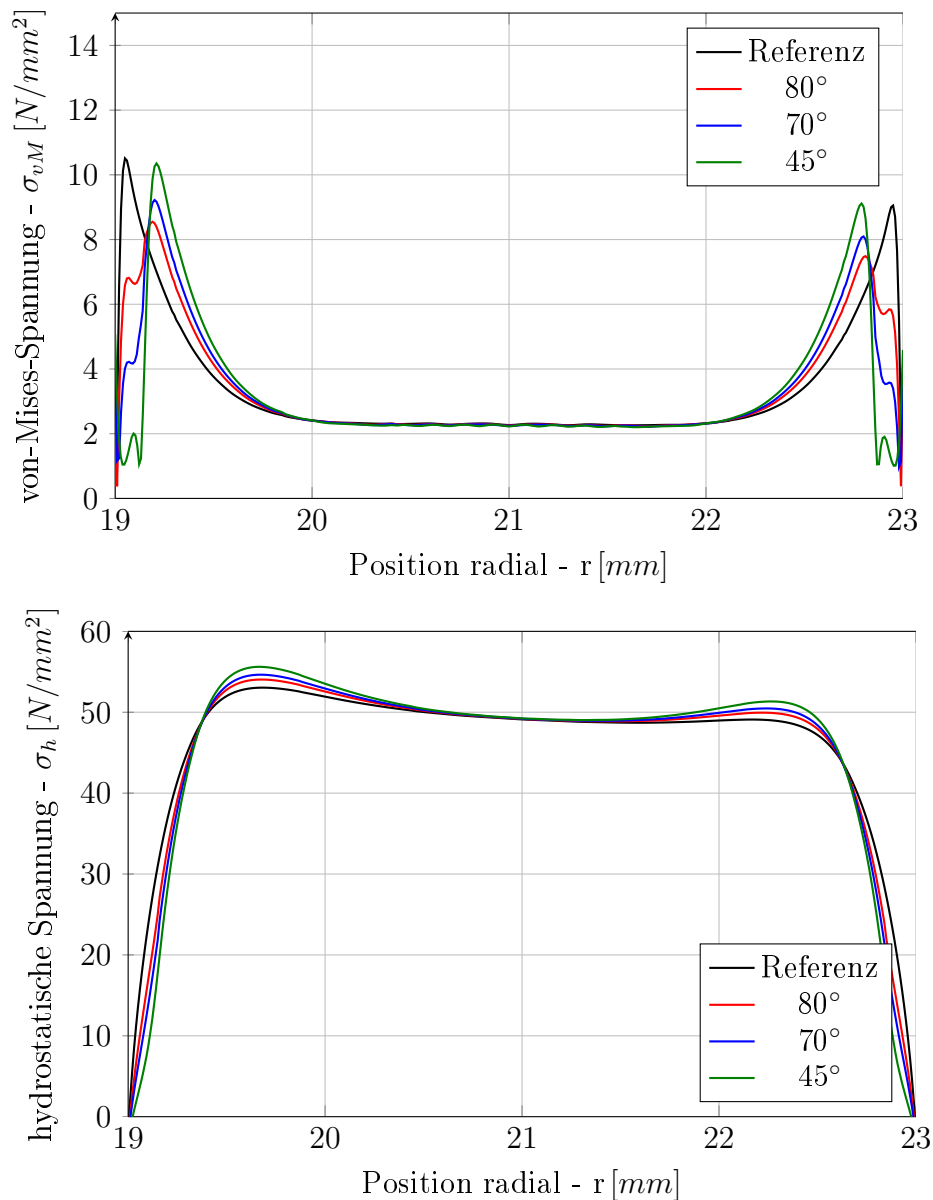


Abbildung 7.2.: Variation Fasenwinkel (Ergebnisse unter Zuglast)

### 7.1.3. Zusammenfassung

Sowohl für die Referenzgeometrie als auch die Variationen mit Fase sind die Spannungsspitzen an den Kanten zu erkennen. Der Haupteffekt, der die Randeffekte hervorruft, ist die Querkontraktionsbehinderung der Klebschicht durch die steiferen Fügepartner. Mit der Modellierung der Fasen wird die Problematik der Querkontraktionsbehinderung weiter in die Mitte des Ringes verschoben. Dies geschieht, da im Fasenbereich eine dickere und damit weniger steife Klebschicht vorhanden ist.

Bezüglich der maximalen von-Mises-Spannung zeigt dieser Ansatz der Geometrievariation eine nur leichte Verbesserung. Betrachtet man zudem den Einfluss der Fasen auf die Spannungsverteilung unter Torsionslast, so ist dieser Ansatz der Geometrieabwandlung eher ungeeignet. Wie in Abbildung 7.3 zu erkennen, wird die homogene Spannungsverteilung der Referenzgeometrie an den Rändern deutlich durch einen Spannungsabfall verschlechtert. Dieses Verhalten ist in ähnlicher Ausprägung auch für die folgenden Variationen der Klebschichtform zu erkennen, sobald die Klebschichtgeometrie von der idealen rechteckigen Form abweicht.

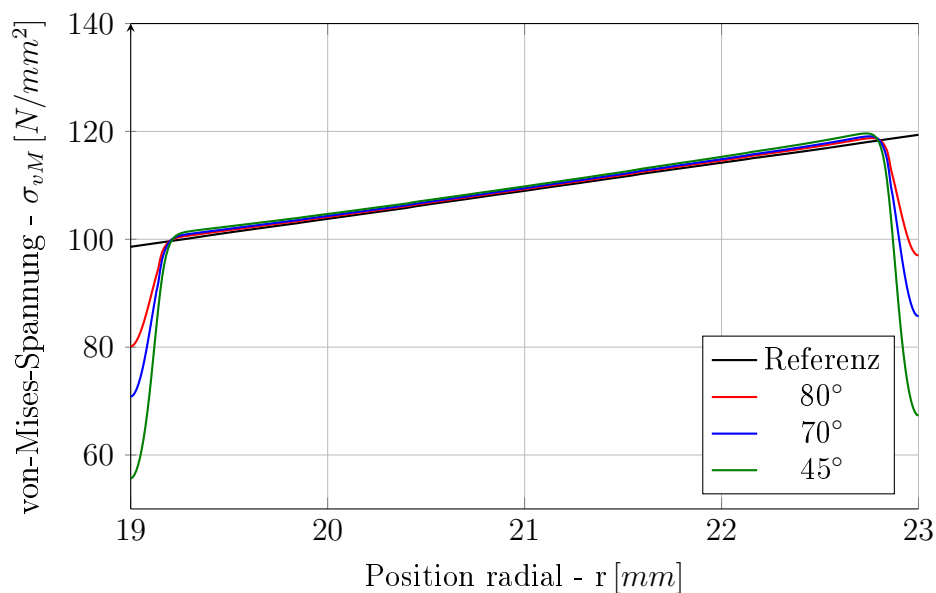


Abbildung 7.3.: Variation Fasenwinkel (Ergebnisse unter Torsionslast)



## 7.2. Geometrie des Klebschichtauslaufs

In diesem Abschnitt wird betrachtet, welchen Einfluss die Geometrie des Klebschichtauslaufes hat. Dabei wird ein gerades Ende (Referenz) mit einer Innen- als auch Außenwölbung verglichen. Diese Geometrievariation wurde aus Arnaud [3] abgeleitet, da sie dort positive Effekte zeigte. In seiner Arbeit wurde die Geometrie durch das händische Entfernen von überschüssigem pastösem Klebstoff begründet. In dieser Arbeit ist diese Geometrievariation als gewollte Geometrieanpassung gedacht. Ein Entfernen von überschüssigem Klebstoff ist bei Filmklebstoffen in dieser Form nicht notwendig.

### 7.2.1. FE-Modell

Auf Basis des Referenzmodelles wird der Klebschichtauslauf von gerade auf gerundet verändert. Die Rundung des Auslaufes entspricht dabei der eines Kreissegmentes, dessen Radius der Klebschichtdicke entspricht (Innen- und Außenwölbung). Dieser Wert wurde aus [3] übernommen und kann für Optimierungen als Ausgangsgröße dienen. Die Geometrievariationen sind in Abbildung 7.4 dargestellt.

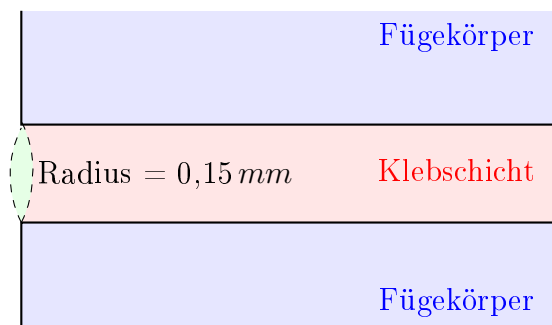


Abbildung 7.4.: Geometrie des Klebschichtauslaufs (Innen- und Außenkrümmung) - halbe Ringbreite dargestellt (an Innen- und Außenradius identisch)

### 7.2.2. Ergebnisse

Die beiden Variationen des Klebschichtauslaufes beeinflussen die auftretenden maximale von-Mises-Spannung in gleichem Maße. Durch die Innenwölbung wird sie erhöht, wohingegen die Außenwölbung sie reduziert. Die hydrostatische Spannung bleibt von

beiden Varianten unbeeinflusst. Beide Einflüsse auf den Spannungsverlauf sind in Abbildung 7.5 gezeigt.

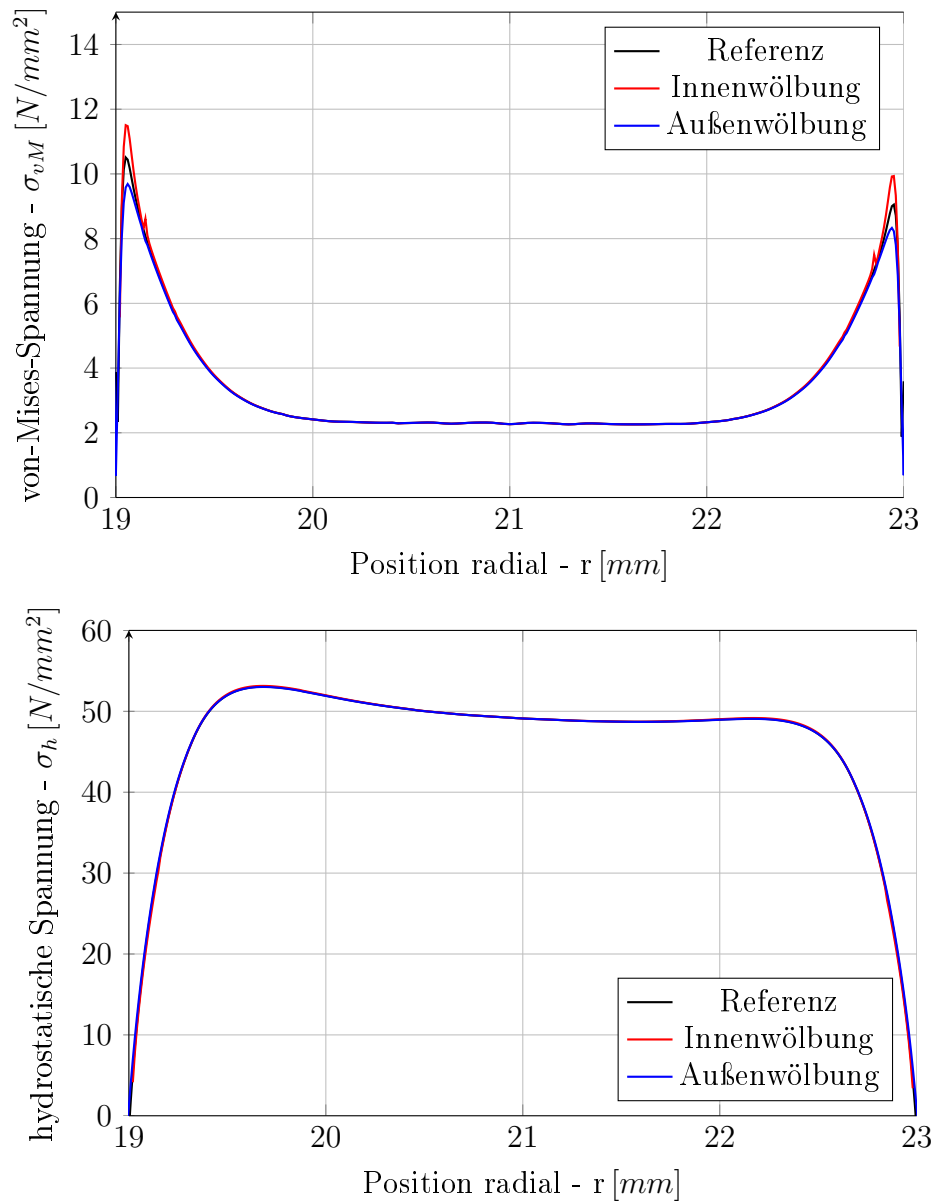


Abbildung 7.5.: Variation Klebschichtauslauf (Ergebnisse unter Zuglast)

### 7.2.3. Zusammenfassung

Bei den hier untersuchten Geometrievariationen zeigt die Außenwölbung eine sichtbare, wenn auch begrenzte Verbesserung des Spannungsverhaltens. Durch die Innenwölbung

wird die Spannungsspitze hingegen vergrößert. Die Wirkungsweise der Außenwölbung auf die Spannungsspitze lässt sich anschaulich erläutern.

Wenn die Zugprobe belastet wird, erfährt die Klebschicht eine Querkontraktion. Bevor die zuvor schon beschriebene Querkontraktionsbehinderung der Fügepartner einsetzt, kann sich die Klebschicht jedoch um die Größe der Außenwölbung „ungestört“ kontrahieren. Dadurch wird der Randeffect reduziert. Die gegenteilige Wirkungsweise tritt bei der Innenwölbung auf.

Diese Form der Geometrieviation beeinflusst die Schubspannung unter Torsionslast in geringerem Maße wie eine gefaste Kante (Abbildung 7.6). Zudem ist der positive Effekt auf die von-Mises-Spannung deutlicher. Bezüglich der praktischen Anwendung ist ein nach Außen gewölbter Klebschichtauslauf, auf Grund der kleinen Dimension, jedoch schwer umzusetzen.

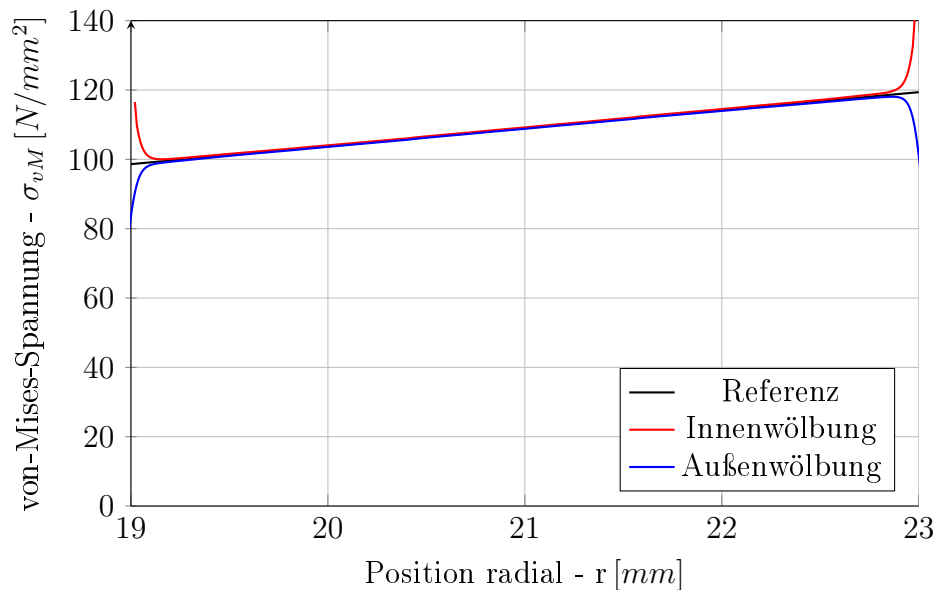


Abbildung 7.6.: Variation Klebschichtauslauf (Ergebnisse unter Torsionslast)

## 7.3. Nuten oberhalb der Fügefläche

Eine weitere Möglichkeit, um die Spannungen durch die Querkontraktionsbehinderung zu reduzieren, ist die Steifigkeit der Fügepartner lokal an den Rändern zu reduzieren. Zu diesem Zweck wird in diesem Abschnitt untersucht, welchen Einfluss Nuten oberhalb der Fügefläche haben.

### 7.3.1. FE-Modell

Wie schon bei den Untersuchungen zuvor, wird das Referenzmodell abgeändert. Um die Steifigkeit lokal an den Rändern zu reduzieren und damit die Querkontraktionsbehinderung zu reduzieren, werden zwei Arten von Nuten betrachtet. Die Geometrie und Position der Nuten ist in Abbildung 7.7 dargestellt.

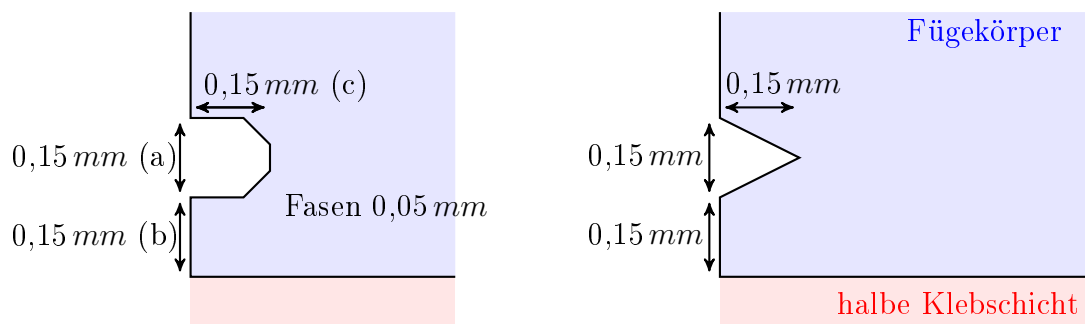


Abbildung 7.7.: Geometrie der untersuchten Rechteck- und Dreiecksnuten - halbe Ringbreite dargestellt (an Innen- und Außenradius identisch)

Die Geometrie und Form ist dabei als exemplarisch zu betrachten und wurde auf Basis von [3] ausgewählt. Die Dimensionen der Nuten sind dabei auf Grund der in [3] gewählten Abhängigkeit von der Klebschichtdicke klein und schwer herzustellen. Daher wurden zwei weitere Variationen der rechteckigen Nute untersucht. Die Breite (a) der rechteckigen Nute (Abbildung 7.7) wurde dabei mit 2 mm (Größenordnung handelsüblicher radialer Stechmeißel) gewählt. Die weiteren konstanten Abmaße sind wie folgt definiert, (b)=1 mm und die Fasen 0,1 mm. Variiert wird die Nuten Tiefe (c) mit Werten von 0,5 und 1 mm.

### 7.3.2. Ergebnisse

Das Einbringen von Nuten in die Fügepartner zeigt einen deutlichen Einfluss auf die von-Mises-Spannung (siehe Abbildung 7.8).

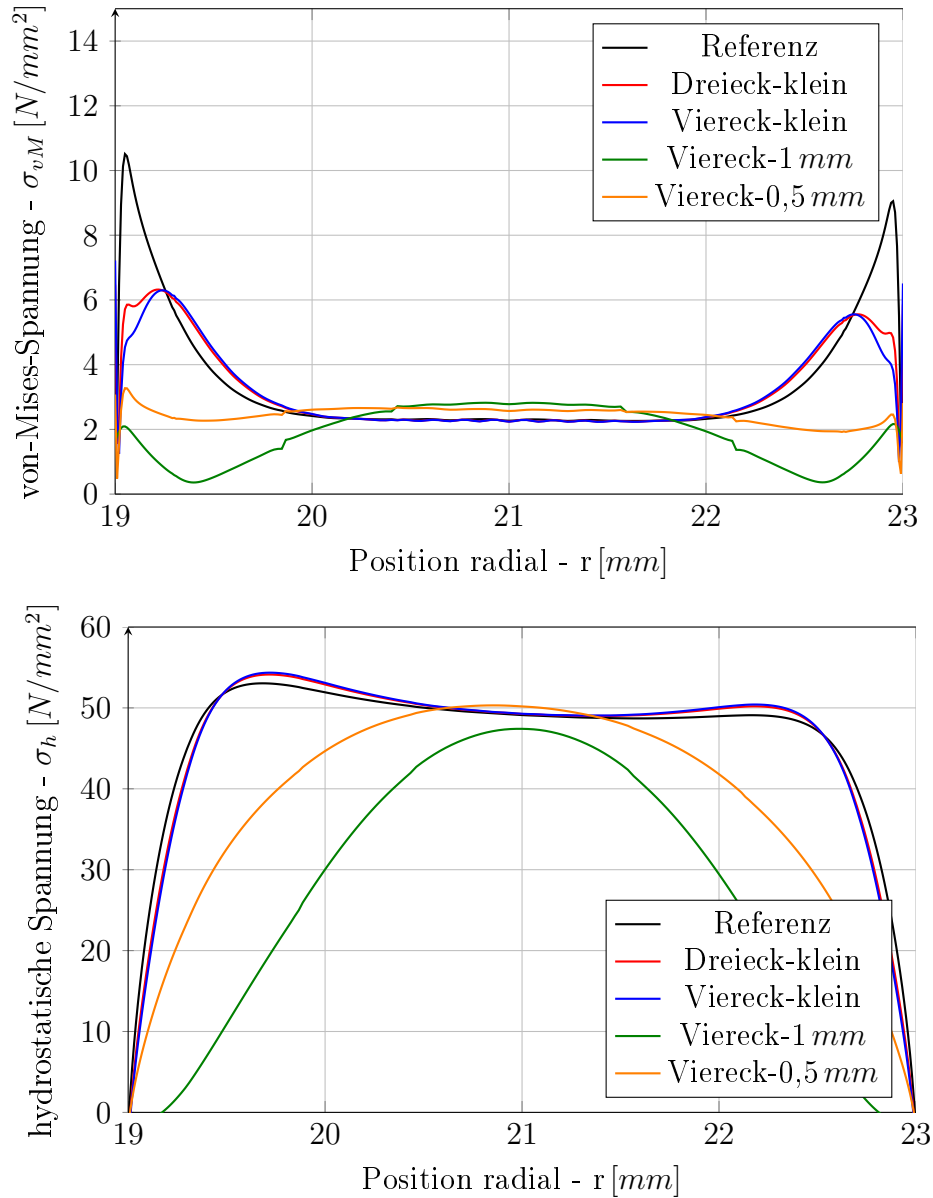


Abbildung 7.8.: Nuten in den Fügepartnern: klein - nach [3], Fertigungsorientiert - 0,5 und 1 mm Tiefe (Ergebnisse unter Zuglast)

Für die Nutengeometrie nach [3] wird der Maximalwert nahezu halbiert, ohne die hydrostatische Spannung signifikant zu beeinflussen. Der Einfluss der fertigungsorientierten Nutengeometrie auf die von-Mises-Spannung ist sogar noch deutlicher. Hier

wird ein annähernd konstanter Spannungszustand erreicht. Jedoch wird mit diesen Nutengeometrien auch die hydrostatische Spannung deutlich negativ beeinflusst. Diese wird deutlich inhomogen.

### 7.3.3. Zusammenfassung

Alle betrachteten Nutengeometrien zeigen einen positiven Einfluss auf die Spannungsspitzen an den Außenrändern des Ringes. Für die Nuten mit kleiner Dimension, die nach [3] modelliert wurden, ist dieser Effekt mit einem geringen Einfluss auf hydrostatische Spannung und Spannung unter Torsionslast verbunden (Abbildung 7.9). Eine nahezu Homogenisierung der von-Mises-Spannung lässt sich mit den fertigungsorientierten Nuten erreichen. Für diese Fügepartnervariante ist jedoch ein deutlicher negativer Einfluss auf hydrostatische Spannung zu erkennen. Die von-Mises-Spannung unter Torsionslast (Abbildung 7.9) wird ebenfalls deutlich beeinflusst, sie bleibt jedoch homogen. Diese Geometrievariante zeigt Potential in weiteren Untersuchungen eine optimierte Nutengeometrie zu finden. Dies soll in dieser Arbeit jedoch nicht weiter thematisiert werden. Ziel ist es die grundlegenden Möglichkeiten darzustellen.

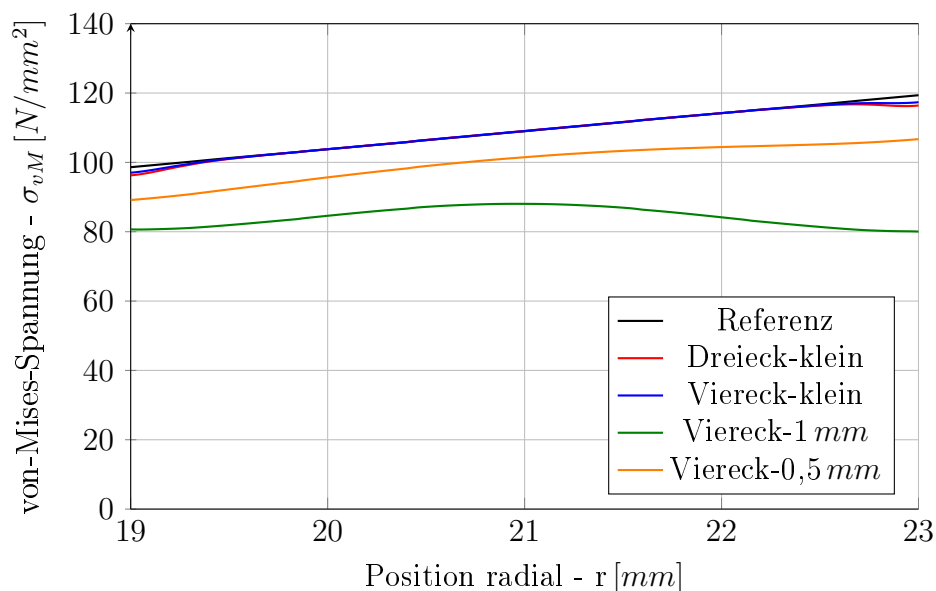


Abbildung 7.9.: Nuten in den Fügepartnern: klein - nach [3], Fertigungsorientiert - 0,5 und 1 mm Tiefe (Ergebnisse unter Torsionslast)

## 7.4. Radius an Fügepartnerkanten

In Abschnitt 7.1 wird eine Fase von  $45^\circ$  als übliche Methode zum Entgraten von Bauteilkanten betrachtet. Insbesondere bei einer CNC-Fertigung der Proben können ebenfalls kleine Radien an Stelle von Fasen verwendet werden. Der Einfluss einer solchen abgerundeten Kante wird hier betrachtet.

### 7.4.1. FE-Modell

Wie schon bei den vorherigen Untersuchungen wird auch hier der Größenbezug zur Klebschichtdicke hergestellt. Die Innen- und Außenkanten der Fügekörper werden mit einem Radius von  $0,15\text{ mm}$  versehen. Die Klebschicht füllt den Fügespalt vollständig und bindet auch an den gesamten Radius an (Abbildung 7.10).

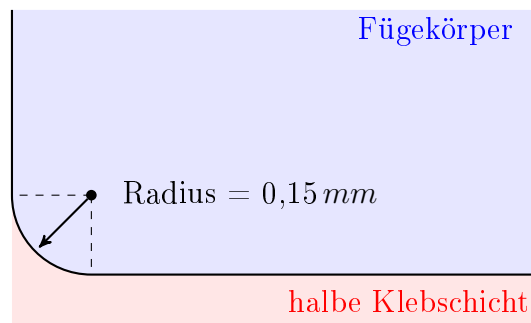


Abbildung 7.10.: Geometrie des untersuchten Eckenradius - halbe Ringbreite dargestellt (an Innen- und Außenradius identisch)

### 7.4.2. Ergebnisse

Hier werden die Ergebnisse von Kantenradius und  $45^\circ$  Fase (siehe Abschnitt 7.1) verglichen. Die beiden Geometrien stellen eine übliche Kontur zum Entgraten eines Bauteils dar und sollen daher hier gegenüber gestellt werden. Das Modell mit Eckenradius zeigt dabei sowohl eine größere Reduktion der maximalen von-Mises-Spannung als auch eine geringere Beeinflussung der hydrostatischen Spannung. Beide Ergebnisse zeigen zudem das Verschieben der Querkontraktionsbehinderung hin zum Startpunkt der Eckenkontur, wie es in Abschnitt 7.1.2 bereits für Fasen beschrieben wurde.

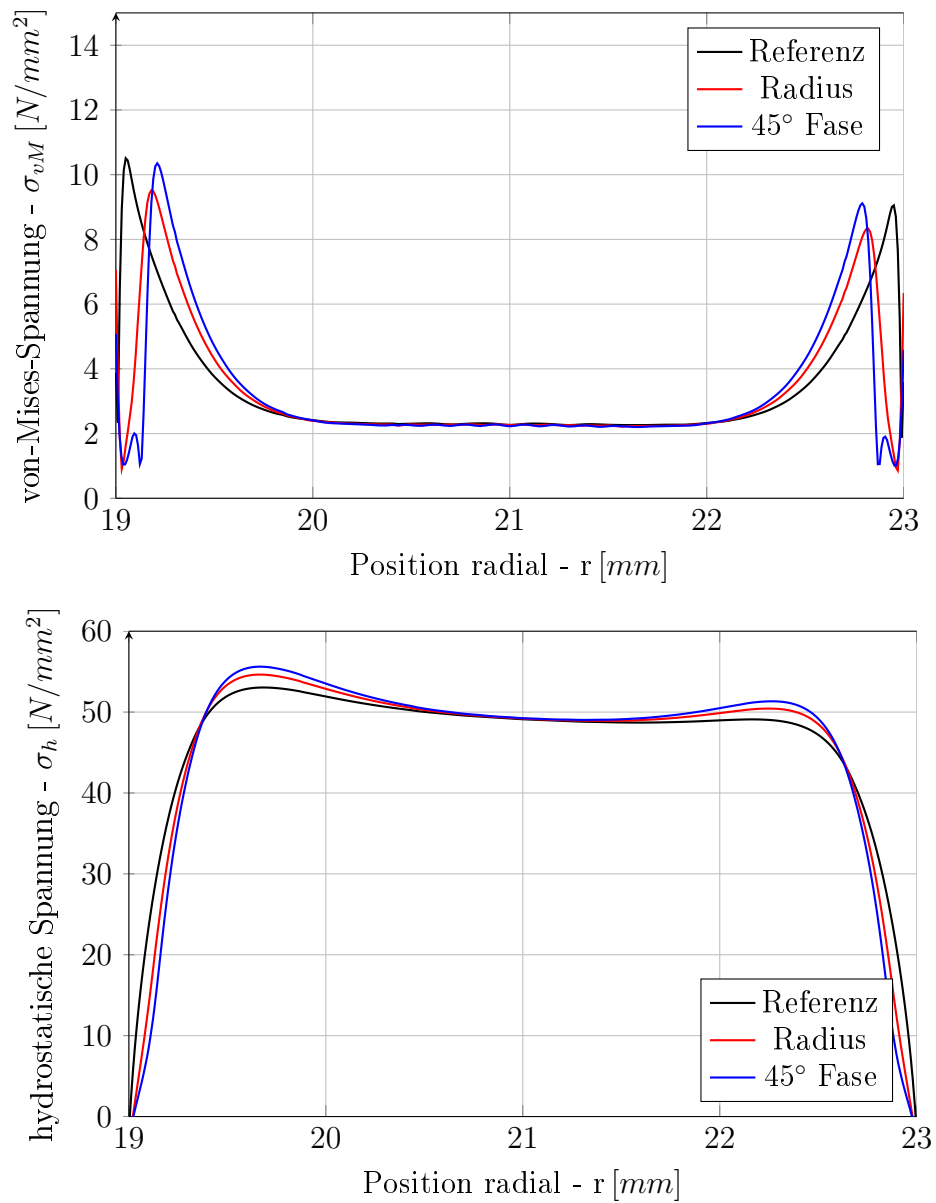


Abbildung 7.11.: Abgerundete Kanten (Ergebnisse unter Zuglast)

### 7.4.3. Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass ein Radius besser zum Entgraten der Proben geeignet ist. Für alle betrachteten Spannungskomponenten, auch unter Torsionslast (siehe Abbildung 7.12), zeigt die Radiengeometrie einen besseren Einfluss als eine Fase.



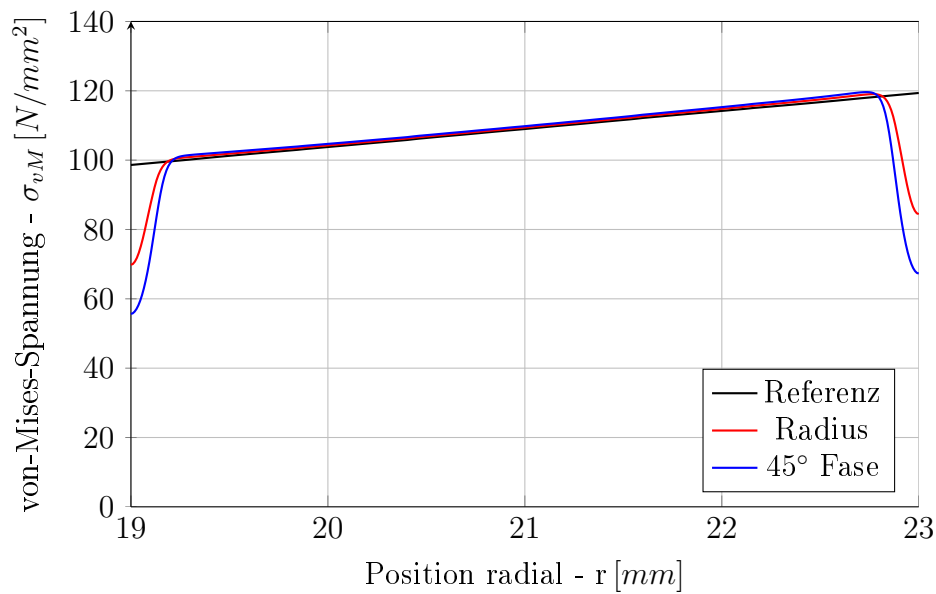


Abbildung 7.12.: Abgerundete Kanten (Ergebnisse unter Torsionlast)

## 7.5. Auswertung Geometrievariation

Die untersuchten Geometrievariationen der Fügepartner zeigen zumeist einen positiven Einfluss auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht. Dies gilt jedoch nur für Zug dominierte Lastfälle. Bezüglich Lastfällen die durch Torsion dominiert werden, hat jede Änderung der Klebschichtgeometrie das auftreten von Randeffekten zur Folge. Lässt sich die Änderung der Klebschichtkontur nicht vermeiden, z. B. beim entgraten, so ist eine Radius als Eckenform zu bevorzugen. Ein vielversprechendes Ergebnis zeigen die eingebrachten Nuten, für diese sind noch die optimalen Formen zu finden. Bei der abschließenden Formfindung der Probenkörper, sollte auch die leicht unterschiedlich stark ausgeprägte Größe der Randeffect an Innen- und Außenseite berücksichtigt werden.



## 8. Zusammenfassung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse dieser Arbeit noch einmal gesammelt dargestellt. Zudem wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsthemen gegeben.

### 8.1. Modellierung und Materialmodelle

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass unter der Randbedingung der Klebverbindungsauslegung ein kontinuumsmechanisches Materialmodell als Modellierungsmethode bruchmechanischen Ansätzen vorzuziehen ist. Im Weiteren wurden nach dieser Auswahl unterschiedliche kontinuumsmechanische Materialmodelle betrachtet. Ergebnis dieser Betrachtung war eine signifikante Abhängigkeit der Klebstoffeigenschaften vom hydrostatischen Spannungszustand. Dieses Ergebnis wurde ebenfalls durch Simulationen an Rohrproben bestätigt. In den Simulationen wurde das Klebstoffverhalten mit dem von-Mises-Materialmodell abgebildet. Die Schubspannung bei Torsionsversuchen konnte mit diesem Materialmodell richtig abgebildet werden, da unter dieser Belastung kein hydrostatischer Spannungszustand auftritt. Für Zugversuche ist der hydrostatische Spannungszustand dominierend, so dass die Simulation dieses Versuchen keine realistischen Ergebnisse lieferte. Andere Materialmodell wie z. B. nach Schlimmer berücksichtigen den hydrostatischen Spannungszustand. In weiteren Untersuchungen ist zu klären, wie groß der Unterschiede zwischen den einzelnen Materialmodellen ist, die den hydrostatischen Spannungszustand berücksichtigen. Sind am Ende einer solchen Untersuchung sowohl Fähigkeiten und Schwächen sowie der Probenaufwand der unterschiedlichen Materialmodelle bekannt, so erlaubt dies eine vom Anwendungsfall abhängige Auswahl des Materialmodells.

## 8.2. Prüfkörpereinfluss auf Qualität der Versuchsergebnisse

Nach der Auswahl der Modellierungsmethode, des Materialmodells und der entsprechenden Eingangsdaten wurden Rohrproben als Probengeometrie identifiziert, mit der alle nötigen Eingangsdaten, auch für komplexe Materialmodelle wie nach Schlimmer, ermittelt werden können. Die Ergebnisse einer Testserie solcher Rohrproben unter unterschiedlichen Lastkombinationen ist gegeben. Diese wurden interpretiert und auf ihre Güte untersucht. Das Ergebnis der Untersuchung war nicht zufriedenstellend. Daher wurden im Anschluss ausgesuchte Fertigungseinflüsse mittels FEM näher untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass die DIN EN 14869-1 [16] für Filmklebstoffe und multiaxiale Lasten zu grob toleriert ist. Zudem wurde gezeigt, welche kritische Eigenspannung durch den benötigten Warmaushärtprozess in die Klebschicht eingebracht werden.

Ebenfalls mit FEM-Simulationen wurde die Probenform an sich untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Geometrievariationen betrachtet, die zu einer Verbesserung der Spannungsverteilung unter Zuglast führen. Ziel war es, die Spannungsverteilung unter Zug über der Rohrbreite zu homogenisieren. Insbesondere die Einbringung einer Nut in die Fügepartner kurz oberhalb der Fügefläche zeigt großes Verbesserungspotential.

## 8.3. Ausblick

Einige Effekte, die bei der Interpretation der Versuchsergebnisse erkannt wurden, können durch Änderungen des Fertigungsverfahrens verbessert werden. Somit ist die Betrachtung des Fertigungsverfahrens der Proben ein wichtiger nächster Arbeitsschritt. Die Eigenspannungen, die durch den Warmaushärtprozess entstehen, lassen sich jedoch nur begrenzt durch das Fertigungsverfahren reduzieren. Eine freies Schrumpfen der Probe beim Abkühlen, entspricht der geringsten Eigenspannung die durch das Fertigungsverfahren zu erreichen sind. Um die Eigenspannungen dennoch weiter zu reduzieren, kann eine Änderung des Fügekörpermaterials in Betracht gezogen werden.

Das Material sollte einen ähnlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen wie der Klebstoff. Die für die Verformungsmessung getroffenen Annahme, des ideal steifen Fügekörpers, muss bei der Materialwahl jedoch ebenfalls berücksichtigt werden.

Auf Basis der betrachteten Geometrievariationen sollte zudem eine optimierte Probengeometrie definiert werden. Diese Optimierung hat dabei die folgenden Randbedingungen:

1. Alle zu testenden Lastfälle berücksichtigen.
2. Fertigungsaspekte berücksichtigen.
3. Kompatibel zur Messtechnik.
4. Kompatibel zur Probenfertigung.



# Abbildungsverzeichnis

2.1. Schubspannungs-Gleitungskurve Klebstoff EA9695 abgeleitet aus Ergebnissen in [24] . . . . .	4
2.2. Definition des Knie-Punktes nach [4] . . . . .	5
2.3. Idealsierte Betrachtung des Rissfortschritts - Zustand 1 (Riss entstanden) → Zustand 2 (Riss geöffnet) . . . . .	6
2.4. Erleuterung der Rissöffnungsarten [20] . . . . .	7
2.5. Spannungs-Rissöffnungsverhalten bei CZM - unterschiedliche Formen des Degradationsverhaltens . . . . .	8
2.6. Beschreibung des plastischen Anteils des Verzerrungsinkrementes $d\varepsilon^p$ an Hand einer exemplarischen Spannungs-Dehnungskurve . . . . .	11
2.7. Plastisches Ver- und Entfestigungsverhalten [25] (nach [32]) - Fließkurve im Hauptspannungsraum (links), Spannungs-Dehnungsverhalten (rechts) . . . . .	13
2.8. Übersicht gängiger Probestypen [31]: Uniaxiale Zugprobe (links), Dicke Zugscherprobe (mitte), Rohrprobe (rechts) . . . . .	14
2.9. Prinzipskizze für Arcan Probe [9] - (a) klassische Arcan Prüfung (b) modifizierte Version . . . . .	16
2.10. Prüfvorrichtung (a) und Probe (b) für modifizierte Arcan Probe bei [9] . . . . .	17
3.1. Fließortkurve nach Schlimmer [30] BELTRAMI-Diagramm . . . . .	28
3.2. Darstellung der in diesem Dokument betrachteten Fließflächen im Hauptspannungsraum (halbierte Fläche) . . . . .	29
4.1. Rohrprobengeometrie [24] - Schema mit Messpunktposition (links), Foto im eingebauten Zustand (rechts) . . . . .	35

4.2.	Schliffbilder der Klebschichten von nicht getesteten Rohrproben [24] . . . . .	37
4.3.	Abweichung ( $\Delta\sigma_{Klebschichtdicke}$ ) der aus Versuchsdaten ermittelten Spannungen durch Variation der realen Klebschichtbreite $\Delta x_{Radius}$ . . . . .	39
4.4.	Generisches Beispiel für Regression und Plausibilisierung an Hand einer Schubspannungs-Gleitungskurve (ohne Nullpunktverschiebung) . . . . .	42
4.5.	Zugspannungs-Dehnungskurve bei Zugbelastung - Regressionskurve über Probenprogramm (Gesamt) sowie für Einzelproben zudem einzelne Messpunkte als Punktwolke . . . . .	46
4.6.	Schubspannungs-Gleitungskurve bei Torsionsbelastung - Regressionskurve über Probenprogramm (Gesamt) sowie für Einzelproben zudem einzelne Messpunkte als Punktwolke . . . . .	47
5.1.	Probenverformung unter Zug - Vergleich FEM zu analytisch (Gesamte freie Länge) . . . . .	53
5.2.	Probenverformung unter Zug - Vergleich FEM zu analytisch (Klebschichtumgebung) . . . . .	53
5.3.	Probenverformung unter Torsion - Vergleich FEM zu analytisch (Gesamte freie Länge) . . . . .	55
5.4.	Probenverformung unter Torsion - Vergleich FEM zu analytisch (Klebschichtumgebung) . . . . .	56
5.5.	Darstellung der unterschiedlichen Idealisierungstufen - Gesamtmodell (links), Ringmodell (mitte), Ringsegmentmodell (rechts) . . . . .	61
5.6.	von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Zuglast (Ring- und Gesamtmodell) . . . . .	63
5.7.	von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Torsionslast (Alle Idealisierungstufen) . . . . .	63
5.8.	von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Zuglast (Ringmodell und Ringsegment) . . . . .	66
5.9.	von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Zuglast (Untersuchung Netzfeinheit Fügekörper) . . . . .	67



5.10. von Mises Spannung in Klebschicht über Rohrbreite - Zuglast (Elemente mit quadratischem Ansatz) . . . . .	67
5.11. Vergleich Eingangsgrößen Materialmodell - Schub- und Zugdaten-Gesamt unter reiner Torsionslast . . . . .	70
5.12. Vergleich Eingangsgrößen Materialmodell - Schub- und Zugdaten-Gesamt unter reiner Zuglast . . . . .	71
5.13. Vergleich Eingangsgrößen Materialmodell - Schub- und Zugdaten-Gesamt unter reiner $\alpha = 1,4$ Lastkombination . . . . .	72
6.1. Vorrichtung zum Fügen der Rohrproben [24] . . . . .	76
6.2. Axiale Spannungen in der Klebschicht - ideale Klemmung (halbe Ringbreite) . . . . .	79
6.3. Axiale Spannungen in der Klebschicht - freie axiale Verformung (halbe Ringbreite) . . . . .	79
6.4. Axiale Spannung in der Klebschicht durch Verkipfung der Fügepartner zueinander (im zylindrisches Koordinatensystem) . . . . .	83
6.5. Tangentiale Schubspannung in der Klebschicht durch Verschiebung der Fügepartner zueinander (im zylindrisches Koordinatensystem) . . . . .	83
6.6. Geometrie der im FE-Modell eingebrachten Pore . . . . .	85
6.7. Axiale Spannung unter Zugbelastung (im zylindrisches Koordinatensystem) . . . . .	86
6.8. Axiale Spannung unter Zugbelastung - Schnittbetrachtung (Mittelknoten der Klebschicht im zylindrisches Koordinatensystem) . . . . .	86
6.9. Tangentiale Schubspannung unter Torsionsbelastung (im zylindrisches Koordinatensystem) . . . . .	87
6.10. Schubspannung unter Torsionsbelastung - Schnittbetrachtung (Mittelknoten der Klebschicht im zylindrisches Koordinatensystem) . . . . .	87
7.1. Geometrie der untersuchten Fasen - halbe Ringbreite dargestellt (an Innen- und Außenradius identisch) . . . . .	90
7.2. Variation Fasenwinkel (Ergebnisse unter Zuglast) . . . . .	91

7.3. Variation Fasenwinkel (Ergebnisse unter Torsionslast) . . . . .	92
7.4. Geometrie des Klebschichtauslaufs (Innen- und Außenkrümmung) - hal- be Ringbreite dargestellt (an Innen- und Außenradius identisch) . . . .	93
7.5. Variation Klebschichtauslauf (Ergebnisse unter Zuglast) . . . . .	94
7.6. Variation Klebschichtauslauf (Ergebnisse unter Torsionslast) . . . . .	95
7.7. Geometrie der untersuchten Rechteck- und Dreiecknuten - halbe Ring- breite dargestellt (an Innen- und Außenradius identisch) . . . . .	96
7.8. Nuten in den Fügepartnern: klein - nach [3], Fertigungsorientiert - 0,5 und 1 mm Tiefe (Ergebnisse unter Zuglast) . . . . .	97
7.9. Nuten in den Fügepartnern: klein - nach [3], Fertigungsorientiert - 0,5 und 1 mm Tiefe (Ergebnisse unter Torsionslast) . . . . .	98
7.10. Geometrie des untersuchten Eckenradius - halbe Ringbreite dargestellt (an Innen- und Außenradius identisch) . . . . .	99
7.11. Abgerundete Kanten (Ergebnisse unter Zuglast) . . . . .	100
7.12. Abgerundete Kanten (Ergebnisse unter Torsionlast) . . . . .	101
A.1. Zuganteil $\alpha_{Last} = 0,4$ [24] . . . . .	121
A.2. Schubanteil $\alpha_{Last} = 0,4$ [24] . . . . .	122
A.3. Zuganteil $\alpha_{Last} = 1,4$ [24] . . . . .	122
A.4. Schubanteil $\alpha_{Last} = 1,4$ [24] . . . . .	122
A.5. Zuganteil $\alpha_{Last} = 5$ [24] . . . . .	123
A.6. Schubanteil $\alpha_{Last} = 5$ [24] . . . . .	123
B.1. Netzstruktur Gesamtmodell v1 - Umgebung Klebschicht . . . . .	125
B.2. Netzstruktur Gesamtmodell v2 - Umgebung Klebschicht . . . . .	125
C.1. Netzstruktur Ringmodell - Umgebung Klebschicht . . . . .	127
D.1. Netzstruktur Modell v1 - Umgebung Klebschicht . . . . .	129
D.2. Netzstruktur Modell v2 - Umgebung Klebschicht . . . . .	129
D.3. Netzstruktur Modell v3 sowie v5 (quadratische Elemente) - Umgebung Klebschicht . . . . .	130

D.4. Netzstruktur Modell v4 - Umgebung Klebschicht . . . . .	130
E.1. Vergleich von Schub- und Zugdaten-Gesamt unter $\alpha = 0,4$ Lastkombi- nation . . . . .	131
E.2. Vergleich von Schub- und Zugdaten-Gesamt unter $\alpha = 5$ Lastkombination	132



# Tabellenverzeichnis

4.1. Abmaße der durch das LZS getesteten Rohrproben . . . . .	34
4.2. Lastkombinationen des durchgeführten Probenprogramms in Maschi- nendaten . . . . .	35
4.3. Beim Test der Rohrproben auftretenden systematische Messfehler . . .	48
4.4. Einfluss von Fertigungsabweichungen auf die Versuchsergebnisse bei Rohr- probentests . . . . .	49
5.1. Ausgangsdaten für analytische Betrachtung - Geometrie und Material- kenndaten . . . . .	52
5.2. Geforderte Dehnungen und Gleitungen - maximal auftretenden Werte im Versuch . . . . .	57
5.3. Aufzubringende Verschiebung für Ring- und Ringsegmentmodell - $E_{Torsion}$	58
5.4. Aufzubringende Verschiebung für Ring- und Ringsegmentmodell - $E_{Zug}$	58
5.5. Varianten der Ringsegmentvernetzung . . . . .	66
6.1. Temperaturabhängige Materialeigenschaften - EA9695 . . . . .	78



# Literaturverzeichnis

- [1] H. Altenbach. *Kontinuumsmechanik: Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*. SpringerLink : Bücher. Springer, Berlin, 2. aufl edition, 2012.
- [2] M. Arcan, Z. Hashin, and A. Voloshin. A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials. *Experimental Mechanics*, 18(4):141–146, 1978.
- [3] N. Arnaud, R. Créac’hcadec, and J. Y. Cognard. A tension/compression–torsion test suited to analyze the mechanical behaviour of adhesives under non-proportional loadings. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 53:3–14, 2014.
- [4] ASTM International. Test Method for Thick-Adherend Metal Lap-Shear Joints for Determination of the Stress-Strain Behavior of Adhesives in Shear by Tension Loading - D 5656-04, 2010.
- [5] M. L. Benzeggagh and M. Kenane. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. *Composites Science and Technology*, 56(4):439–449, 1996.
- [6] R. M. Caddell, R. S. Raghava, and A. G. Atkins. A yield criterion for anisotropic and pressure dependent solids such as oriented polymers. *Journal of materials and science*, 1973.
- [7] M. N. Charalambides and A. Olusanya. *The Constitutive Models Suitable for Adhesives in some Finite Element Codes and Suggested Methods of Generating*

- the Appropriate Materials Data: NPL Report CMMT(B)130*. National Physical Laboratory, Teddington, 1997.
- [8] W. K. Chiu and R. Jones. Unified constitutive model for thermoset adhesive, FM73. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 15(3):131–136, 1995.
- [9] J. Y. Cognard, P. Davies, B. Gineste, and L. Sohier. Development of an improved adhesive test method for composite assembly design. *Composites Science and Technology*, 65(3-4):359–368, 2005.
- [10] L. Crocker and G. Dean. *The use of finite element methods for design with adhesives*, volume 48 of *Measurement good practice guide*. National Physical Laboratory, Teddington and Middlesex, 2001.
- [11] Dassault Systems. *Dokumentaion zu Abaqus 6.14*. Dassault Systems, 2014.
- [12] G. Dean, L. Crocker, B. Read, and L. Wright. Prediction of deformation and failure of rubber-toughened adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24(4):295–306, 2004.
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Klebstoffe – Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen - DIN EN 15870, August 2009.
- [14] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe -Prüfverfahren: Bestimmung der interlaminren Energiefreisetzungsraten Mode I - DIN EN 6033, Dezember 1995.
- [15] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe -Prüfverfahren: Bestimmung der interlaminren Energiefreisetzungsraten Mode II - DIN EN 6034, Dezember 1995.
- [16] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Strukturklebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf verklebter Hohlzylinder - DIN EN 14869-1, Juli 2011.



- [17] D. C. Drucker and W. Prager. *Soil mechanics and plastic analysis or limit design*, volume no. 64 of *Technical report*. Division of Applied Mathematics, Brown University, Providence and R.I, 1951.
- [18] FAA. *Shear Stress-Strain Data for Structural Adhesives: DOT/FAA/AR-02/97*. FAA, Washington, 2002.
- [19] D. Gross, W. Hauger, W. Schnell, and J. Schröder. *Technische Mechanik*, volume ; Bd. 2 of *Technische Mechanik*. Springer, Berlin [u.a.], 8., erw. aufl edition, 2005.
- [20] D. Gross and T. Seelig. *Bruchmechanik: Mit einer Einführung in die Mikromechanik*. Springer, Berlin and Heidelberg [u.a.], 4., bearb. aufl edition, 2007.
- [21] G. Habenicht. *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. VDI. Springer, Berlin, 6., aktualisierte aufl edition, ©2009.
- [22] D. Hartung. *Materialverhalten von Faserverbundwerkstoffen unter dreidimensionalen Belastungen*. Dissertation, Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig, 2009.
- [23] M. Jung and U. Langer. *Methode der finiten Elemente für Ingenieure*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013.
- [24] Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH. *Durchführung von Materialversuchen an einem Filmklebstoff: Bericht Nr. 5040/13-3/01*. 2014.
- [25] S. Menzel. *Zur Berechnung von Klebverbindungen hybrider Karosseriestrukturen beim Lacktrocknungsprozess*. Dissertation, Technischen Universität Dresden, Dresden, 2011.
- [26] R. v. Mises. Mechanik der festen Körper im plastisch- deformablen Zustand. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1913:582–592, 1913.
- [27] M. Munzinger. *Optimierung von Klebeverbindungen nach dem Vorbild der Natur*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2005.

- [28] National Physical Laboratory. *Manual for the Calculation of Elastic-Plastic Materials Models Parameters*. National Physical Laboratory, 2007.
- [29] K. F. Reiling and F. Altenwegner. *Geschwindigkeitsabhängiges Klebstoffverhalten eines 1K Epoxidklebstoffs*. GFT-Tagung, 2012.
- [30] M. Schlimmer. Grundlagen zur Berechnung des mechanischen Verhaltens von strukturellen Klebverbindungen des Fahrzeugbaus. *Tagungsband 10. Paderborner Symposium Fügetechnik*, 2003.
- [31] M. Schlimmer. Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen: Teile 1 bis 9. *adhäsion Kleben&Dichten*, (5.04 bis 6.06), 2004.
- [32] J. C. Simo and Hughes, Thomas J. R. *Computational inelasticity*, volume v. 7 of *Interdisciplinary applied mathematics*. Springer, New York, ©1998.
- [33] A. P. Vassilopoulos. *Fatigue and fracture of adhesively-bonded composite joints: Behaviour, simulation and modelling*, volume number 52 of *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*. 2014.
- [34] C. H. Wang and L. Rose. Compact solutions for the corner singularity in bonded lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(2):145–154, 2000.
- [35] M. Zgoul and A. D. Crocombe. Numerical modelling of lap joints bonded with a rate-dependent adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24(4):355–366, 2004.

# Appendices



# A. Testergebnisse Rohrproben

## Lastkombinationen

In diesem Abschnitt des Anhangs werden die bisher nicht gezeigten Versuchsergebnisse aus dem Bericht des LZS dargestellt. Die Versuche wurden unter Zug-Torsionslast Kombination durchgeführt. Daher wurden die Versuche sowohl für Zugspannung-Dehnung als auch Schubspannung-Gleitung ausgewertet. Die folgenden Abbildungen sind direkt aus dem Bericht des LZS [24] entnommen.

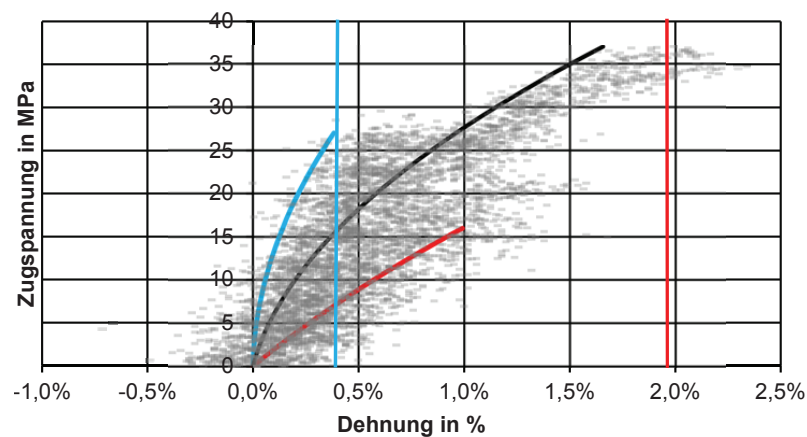


Abbildung A.1.: Zuganteil  $\alpha_{Last} = 0,4$  [24]

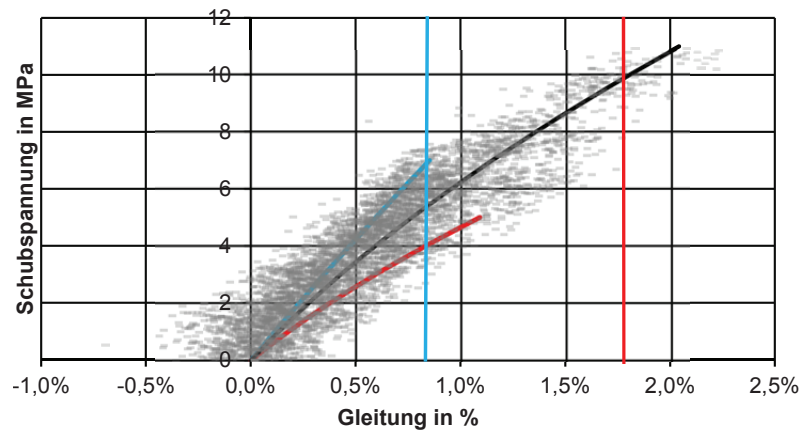


Abbildung A.2.: Schubanteil  $\alpha_{Last} = 0,4$  [24]

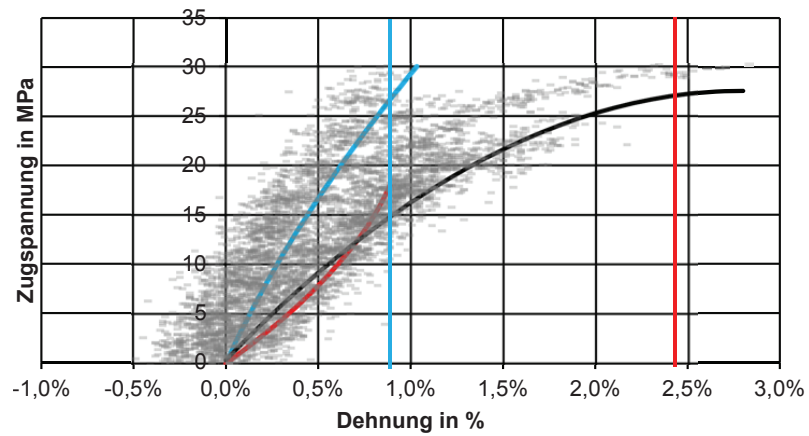


Abbildung A.3.: Zuganteil  $\alpha_{Last} = 1,4$  [24]

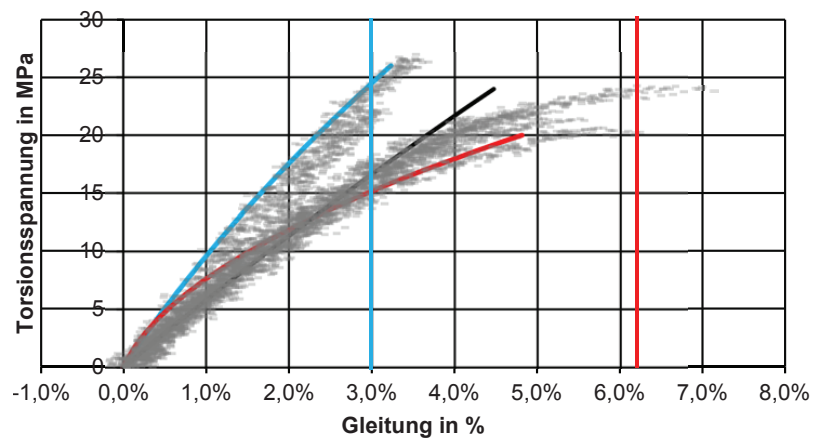


Abbildung A.4.: Schubanteil  $\alpha_{Last} = 1,4$  [24]

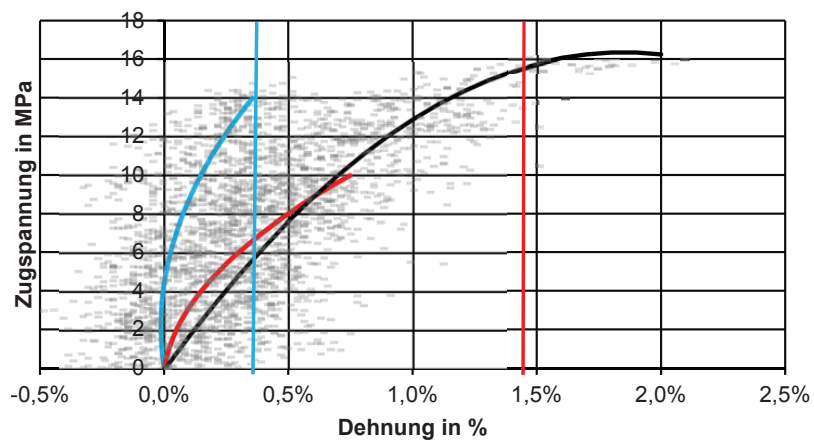


Abbildung A.5.: Zuganteil  $\alpha_{Last} = 5$  [24]

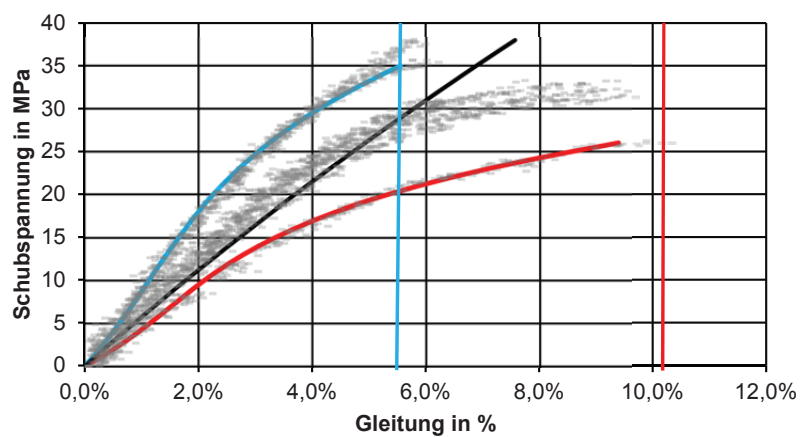


Abbildung A.6.: Schubanteil  $\alpha_{Last} = 5$  [24]





## B. Detail Darstellung der Gesamtmodell Vernetzung

In diesem Abschnitt des Anhanges wird die Vernetzungen der Gesamtmodell dargestellt. In den Abbildungen ist das Netz über der Ringbreite dargestellt. In rot ist die Klebschicht zu erkennen und in blau die Fügepartner.

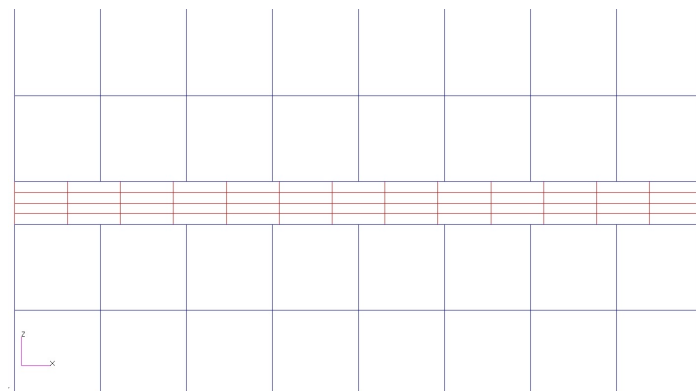


Abbildung B.1.: Netzstruktur Gesamtmodell v1 - Umgebung Klebschicht

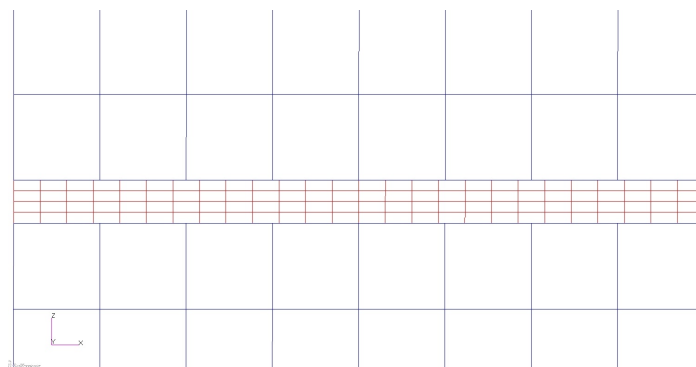


Abbildung B.2.: Netzstruktur Gesamtmodell v2 - Umgebung Klebschicht



## C. Detail Darstellung der Ringmodell Vernetzung

In diesem Abschnitt des Anhanges wird die Vernetzungen des Ringmodells dargestellt. In der Abbildung ist das Netz über der Ringbreite dargestellt. In rot ist die Klebschicht zu erkennen und in blau die Fügepartner.

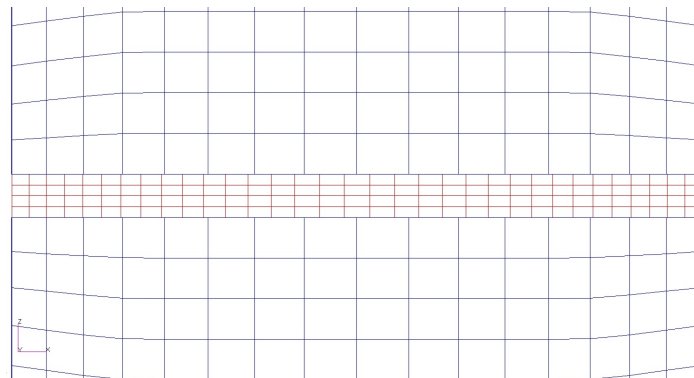


Abbildung C.1.: Netzstruktur Ringmodell - Umgebung Klebschicht



## D. Detail Darstellung der Ringsegment Vernetzung

In diesem Abschnitt des Anhanges werden die Vernetzungen des Ringsegmentmodells dargestellt. In den Abbildungen ist jeweils das Netz über der *halben* Ringbreite dargestellt. In rot ist die Klebschicht zu erkennen und in blau ein Fügepartner (diese sind identisch vernetzt).

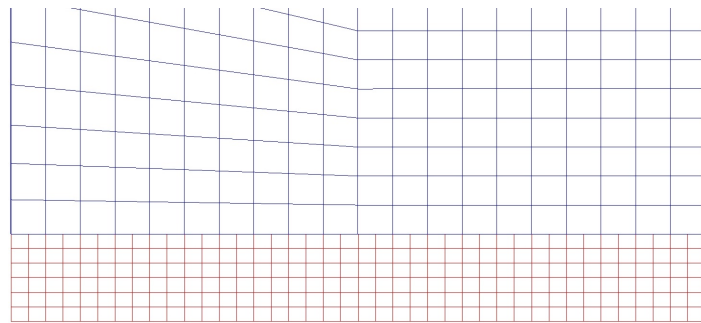


Abbildung D.1.: Netzstruktur Modell v1 - Umgebung Klebschicht

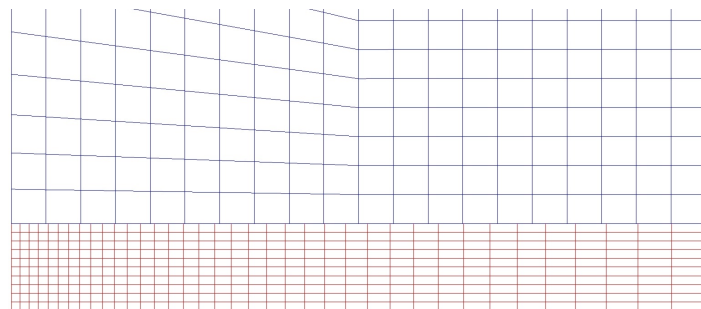


Abbildung D.2.: Netzstruktur Modell v2 - Umgebung Klebschicht

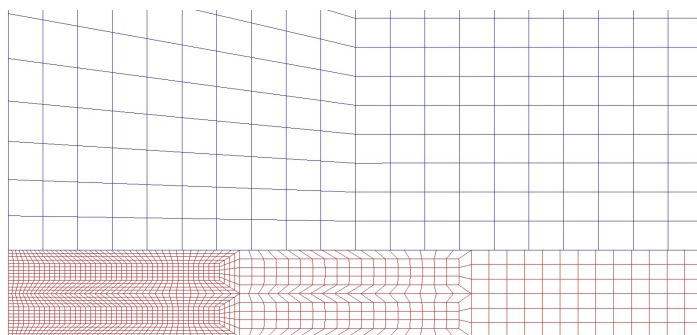


Abbildung D.3.: Netzstruktur Modell v3 sowie v5 (quadratische Elemente) - Umgebung Klebschicht

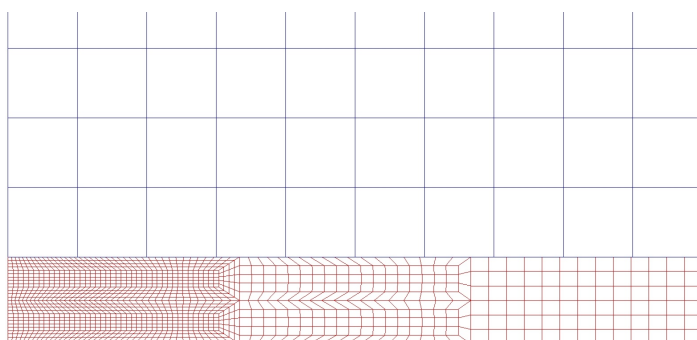


Abbildung D.4.: Netzstruktur Modell v4 - Umgebung Klebschicht

## E. Simulationsergebnisse zu Kombinierten Lastfällen

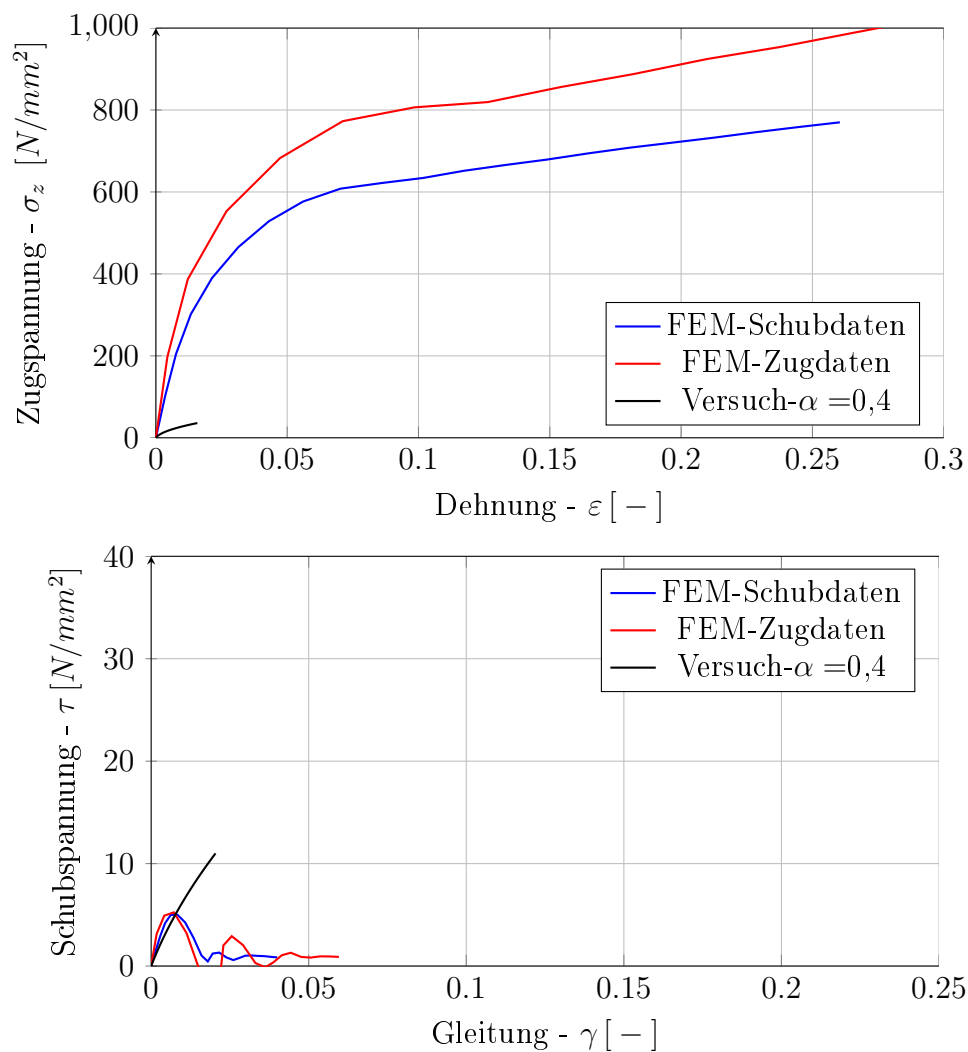


Abbildung E.1.: Vergleich von Schub- und Zugdaten-Gesamt unter  $\alpha = 0,4$  Lastkombination

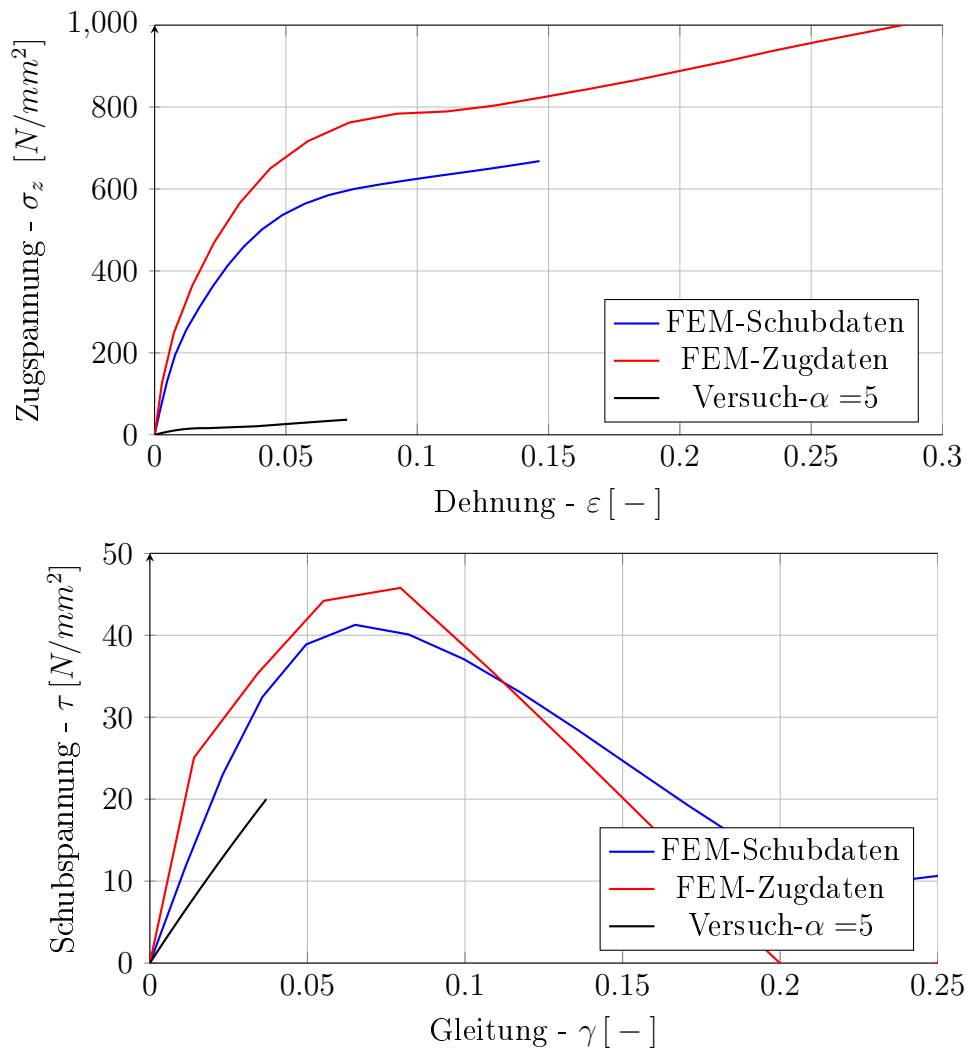


Abbildung E.2.: Vergleich von Schub- und Zugdaten-Gesamt unter  $\alpha = 5$  Lastkombination